

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Севастопольский государственный университет»

**№ 3(23)**  
**2021**

Выходит 4 раза год

---

# ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Сборник научных трудов**

*В сборнике печатаются материалы международной конференции  
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в  
машиностроении 2021» (6 – 10 сентября 2021 года)*

---

**Севастополь 2021**

---

### СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Главный редактор**

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

**Зам. главного редактора**

к.т.н., доц. – РОЩУПКИН С.И.

**Научный редактор**

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

**Отв. секретарь**

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

**Редакционная коллегия**

|                 |                                          |
|-----------------|------------------------------------------|
| АБДУЛГАЗИС У.А. | д. т. н., проф.<br>(г. Симферополь)      |
| ГЛЕЗЕР А. М.    | д. ф-м. н, проф. (г. Москва)             |
| БОХОНСКИЙ А.И.  | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| БУРНАШОВ М.А.   | д. т. н., доц. (г. Орел)                 |
| ДУЮН Т.А.       | д. т. н., доц. (г. Белгород)             |
| КОЗЛОВ А.М.     | д. т. н., проф. (г. Липецк)              |
| КОПП В.Я.       | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| МАЛЫШЕВА Г.В.   | д. т. н., проф. (г. Москва)              |
| МИХАЙЛОВ А.Н.   | д. т. н., проф., (г. Донецк,<br>Украина) |
| НОСЕНКО В.А.    | д. т. н., проф. (г. Волжский)            |
| ОБЖЕРИН Ю.Е.    | д. т. н., проф. (г. Севастополь)         |
| НОВОСЕЛОВ Ю.К.  | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| ПАШКОВ Е.В.,    | д. т. н., проф.<br>(г. Севастополь)      |
| СУСЛОВ А.Г.     | д. т. н., проф. (г. Москва)              |
| ФЕДОНИН О.Н.    | д. т. н., проф. (г. Брянск)              |
| ЯРОШЕНКО А.А.   | д. т. н., проф. (г. Севастополь)         |

### СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Бохонский А.И., Левченко Е.А. Образование бочкообразности при токарной обработке нежестких валов.....                                                    | 4  |
| Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Структурно-компоновочный синтез резьбонарезных станочных модулей.....                                       | 10 |
| Теминдаров И.Э., Скакун В.В. Зависимость шероховатости поверхности от условий резания при фрезеровании стали 45 .....                                    | 18 |
| Братан С.М., Стадник Т.В., Часовитина А.С. Взаимосвязь температуры с режимами резания при ленточном ротационном шлифовании титанового сплава ВТ3-1 ..... | 23 |
| Тараховский А.А., Тараховский А.Ю. Управление деформациями эластичных кольцевых деталей в автоматизированных сборочных процессах .....                   | 30 |
| Новиков П.А., Сопин П.К. Математическая модель процесса нарезания внутренних резьб малых диаметров (М2 – М6) .....                                       | 35 |
| Витренко В.А., Ефимов А.А., Михайлова А.Д. Производящая поверхность гиперболоидного зубообкатного инструмента .....                                      | 41 |

**Учредитель и издатель:** ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

**Сборник зарегистрирован** Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

## COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

**Chief Editor**

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

**Associate Editor in Chief**

Ph.D., Associate Prof. – ROSHCHUPKIN S.I.

**Scientific Editor**

Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.

**Executive Secretary**

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

**Editorial team**

|                 |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|
| ABDULGAZIS U.A. | D.Sc., Prof. (Simferopol)         |
| GLEZER A.M.     | D.Sc., Prof. (Moscow)             |
| BOHONSKIY A.I.  | D.Sc., Prof. (Sevastopol)         |
| BURNASHOV M.A.  | D.Sc., Associate Prof. (Orel)     |
| DUYUN T.A.      | D.Sc., Associate Prof. (Belgorod) |
| KOZLOV A.M.     | D.Sc., Prof. (Lipetsk)            |
| KOPP V.YA.      | D.Sc., Prof. (Sevastopol)         |
| MALYSHEVA G.V.  | D.Sc., Prof. (Moscow)             |
| MIKHAILOV A.N.  | D.Sc., Prof. (Donetsk)            |
| NOSENKO V.A.    | D.Sc., Prof. (Volzhsky)           |
| OBEZHERIN YU.E. | D.Sc.Prof. (Sevastopol)           |
| NOVOSELOV YU.K. | D.Sc., Prof. (Sevastopol)         |
| PASHKOV E.V.    | D.Sc., Prof. (Sevastopol)         |
| SUSLOV A.G.     | D.Sc., Prof. (Moscow)             |
| FEDONIN O.N.    | D.Sc., Prof. (Bryansk)            |
| YAROSHENKO A.A. | D.Sc., Prof. (Sevastopol)         |

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Bokhonsky A.I., Levchenko E.A.</b> Barrelation formation during non-rigid shaft turning .....                                                               | <b>4</b>  |
| <b>Kharchenko A.O., Kharchenko A.A., Vladetskaya E.A.</b> Structural-compositioning synthesis of threading Machine modules .....                               | <b>10</b> |
| <b>Temindarov I.E., Skakun V.V.</b> Dependence of surface roughness on the cutting conditions during milling steel 45 .....                                    | <b>18</b> |
| <b>Bratan S.M., Stadnik T.V., Chasovitina A.S.</b> The relationship of temperature with cutting modes during belt rotary grinding of titanium alloy VT3-1..... | <b>23</b> |
| <b>Tarakhovskiy A.A., Tarakhovskiy A.Yu.</b> Control of deformations of elastic ring parts in automated assembly processes .....                               | <b>30</b> |
| <b>Novikov. P.A. Sopim P.K.</b> Mathematical model of the process of cutting internal threads of small diameters (M2-M6).....                                  | <b>35</b> |
| <b>Vitrenko V.A., Efimov A.A., Miknailova A.D.</b> Producing surface of hyperbola teeth-rolling instrument.                                                    | <b>41</b> |

**Founder and publisher:** FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

**The collection is registered** by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 621.01

## ОБРАЗОВАНИЕ БОЧКООБРАЗНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

А.И. Бохонский<sup>1</sup>, Е.А. Левченко<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

### Аннотация

В первом приближении описан механизм образования погрешности типа «бочкообразности» при токарной обработке нежестких валов с их закреплением в жестких центрах. Минимальная толщина срезаемого слоя в среднем сечении заготовки обусловлена возрастанием упругих перемещений в связи с изгибными деформациями заготовки, что приводит к уменьшению силы резания. В предложенной модели учитываются конечные жесткости резца и заготовки. Доказано, что при использовании многопроходной обработки необходимо учитывать образующуюся бочкообразность от предыдущей операции точения.

**Ключевые слова:** токарная обработка, жесткие центры, нежесткие цилиндрические заготовки, изгибные деформации, образование бочкообразности, многопроходная обработка.

## BARRELATION FORMATION DURING NON-RIGID SHAFT TURNING

A.I. Bokhonsky<sup>1</sup>, E.A. Levchenko<sup>1</sup><sup>1</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

In the first approximation, the mechanism of formation of an error of the "barrel-shaped" type during turning of non-rigid shafts with their fastening in rigid centers is described. The minimum thickness of the cut layer in the middle section of the workpiece is due to an increase in elastic displacements due to bending deformations of the workpiece, which leads to a decrease in the cutting force. The proposed model takes into account the final rigidity of the cutter and the workpiece. It is proved that when using multi-pass machining, it is necessary to take into account the resulting barrel shape from the previous turning operation.

**Keywords:** turning, rigid centers, non-rigid cylindrical blanks, bending deformations, barrel formation, multi-pass machining.

### Введение

Автоматической токарной обработке широкого класса нежестких деталей посвящены работы [1-10] и другие.

Аналізу точности, оптимізації і автоматическому управлінню процесом токарної обробки присвячені труди Б.С. Балакшина, Б.М. Базрова, В.С. Корсакова, В.М. Каширина, А.В. Кудинова, Ю.К. Новоселова, В.А. Астафьева, Д.М. Решетова, В.Г. Подпоркин, В.Н. Подураева, В.М. Соколенцева, А.П. Соколовского и других.

Задачі компенсації упругих переміщень і неперервного управління деформованим станом нежестких заготовок при токарній обробці розгляда-

лись, наприклад, в роботах [3, 4]. В цих роботах зверталось увагу на закономірності утворення погрешностей обробки і пошук компенсуючих або управляючих впливів для підвищення точності автоматическої токарної обробки нежестких деталей.

Процес токарної обробки нежестких деталей супроводжується повільними і швидкими рухами, складними коливаннями і тому продовжує викликати інтерес як з позиції механіки деформованого твердого тіла, так і з точки зору синтезу неперервного оптимального управління повільними і швидкими рухами, супроводжуваними процесом обробки.

**Цель исследования** – создание приближенной модели образования погрешности типа бочкообразности при токарной обработке нежестких валов, закрепленных в центрах повышенной жесткости.

Анализ образования погрешностей обработки типа бочкообразности для вала, закрепленного в центрах, жесткости которых достаточно большие, основывается на ряде допущений.

В механизме образования погрешности учитывается конечная жесткость резца в радиальном направлении (по нормали к обрабатываемой цилиндрической поверхности заготовки). Если бы обрабатываемая заготовка была абсолютно жесткой, то радиальную составляющую силы резания можно записать как

$$P_y = c_1 \cdot \Delta_1,$$

где  $c_1$  – продольная жесткость резца (Н/м);  $\Delta_1$  – деформация резца в продольном направлении. В этом случае снималась бы требуемая толщина срезаемого слоя и в первом приближении можно принять

$$\Delta_T = h,$$

где  $h$  – требуемая толщина срезаемого слоя материала заготовки.

Радиальная составляющая силы резания в этом случае

$$P_y = \eta_k \cdot h,$$

где

$$\eta_k = k \cdot \tau \cdot a,$$

где  $k$  – безразмерный коэффициент;  $\tau$  – напряжение, характеризующее сопротивление резанию,  $a$  – ширина стружки.

При учете деформации заготовки перемещение точки взаимодействия резца с деталью в радиальном направлении обозначим через  $\Delta$ .

Тогда на основании закона сохранения энергии в случае обработки абсолютно жесткой заготовки она равна сумме энергий, накапливаемых резцом и жесткой деталью:

$$\frac{c_1 \cdot \Delta_1^2}{2} = \frac{c_1 \cdot \Delta^2}{2} + \frac{c_2 \cdot \Delta^2}{2}, \quad (1)$$

где  $c_2$  – коэффициент жесткости заготовки в зоне резания. Из (1) перемещение равно

$$\Delta = \sqrt{\frac{c_1}{c_1 + c_2}} \cdot \Delta_1. \quad (2)$$

Из (2) следует, что  $\Delta < \Delta_1$ .

Умножим равенство (2) на  $c_2$  с учетом  $\Delta_1 = \frac{P_y}{c_1}$ , получим:

$$\Delta \cdot c_2 = P_y^k = P_y \frac{c_2}{c_1} \sqrt{\frac{c_1}{c_1 + c_2}}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что  $P_y^k < P_y$ , т.е. при учете деформации заготовки для радиальной составляющей силы резания можно записать:

$$P_y^k = \eta_k \cdot h_1. \quad (4)$$

Толщина срезаемого слоя с учетом деформации заготовки

$$h_1 = \frac{P_y}{\eta_k} \cdot \frac{c_2}{c_1} \sqrt{\frac{c_1}{c_1 + c_2}} < h. \quad (5)$$

Погрешность заготовки (в среднем сечении) в виде бочкообразности

$$\delta = 2(h - h_1). \quad (6)$$

На рис. 1 изображена заготовка с образованной бочкообразностью при точении.

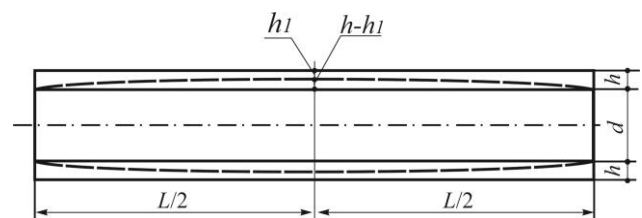


Рис. 1 – Схема заготовки с образованием бочкообразной формы

Коэффициент жесткости по середине заготовки вычисляется как

$$c_2 = \frac{48EJ}{L^3}, \quad (7)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;  $J$  – осевой момент инерции поперечного сечения; без учета бочкообразности  $J = \frac{\pi d^4}{64}$ ,

где  $d$  – диаметр заготовки.

Если  $J(x) \neq \text{const}$ , то выражение для энергии  $E_n$  и перемещения  $W(x)$  чрезвычайно

громоздкие и поэтому здесь не приводятся. Если  $J = \text{const}$  и  $x = a$ , то

$$W(a) = -\frac{Pa}{6EJL^6} \begin{pmatrix} -172L^4a^4 + 4L^8 - 21L^5a^3 + \\ +462a^5L^3 - 26aL^7 - 535a^6L^2 + \\ 56a^2L^6 + 212a^7L - 60a^8 \end{pmatrix}$$

В среднем сечении  $a = L/2$ ,  $x = L/2$  перемещение

$$W(L/2) = \frac{0,02083PL^3}{EJ}, \quad (9)$$

что практически совпадает с точным решением с постоянным диаметром заготовки.

При последующем проходе для устранения бочкообразности необходимо чтобы сила резания возрастала по мере движения к середине заготовки, а затем уменьшалась.

В случае заготовки переменного сечения нет точного решения. Поэтому принято:

$$W(x) = \sum_{i=1}^5 C_i x^i, \quad (10)$$

и следовательно,  $W'(x) = \frac{dw}{dx}$ ,

$W''(x) = \frac{d^2w}{dx^2}$ . При определении произволь-

ных постоянных учтены условия

$$W(0) = 0; W(L) = 0; W(L/2) = \frac{PL^3}{48EJ}. \quad (11)$$

Коэффициенты  $C_4$  и  $C_5$  найдены из условия минимума полной энергии деформированного состояния заготовки.

$$\mathcal{E}_\kappa = \frac{1}{2} \int_0^L EJ(x) W''(x) dx - P_y W(a) = \min. \quad (12)$$

$$\frac{d\mathcal{E}_\kappa}{dC_4} = 0, \quad \frac{d\mathcal{E}_\kappa}{dC_5} = 0. \quad (13)$$

При учете бочкообразности осевой момент инерции поперечного сечения вычисляется так:

$$J(x) = \pi \left( d + 2 \left( \frac{4h_1x}{L} - \frac{4h_2x^2}{L^2} \right) \right)^4 / 64. \quad (14)$$

Возникающие аналитические особенности при вычислении интеграла (13) трудно преодолимы даже при использовании со-

временных систем компьютерной алгебры. Поэтому в численном исследовании образования погрешности применительно  $J = \text{const}$ .

### Пример непрерывного управления деформированием нежесткой заготовки при автоматической токарной обработке заготовок

Принят квадратичный критерий оптимальности и ограничения в виде равенств. Необходимо найти управляющие опорные моменты управления деформируемым состоянием нежесткой заготовки в процессе автоматической токарной обработки при ограничениях на перемещение и угол поворота, на перемещение и кривизну.

В качестве критерия оптимальности использовался интегральный квадратичный критерий, который означает минимум общего деформированного состояния нежесткой заготовки, а в качестве ограничения – равенство нулю кривизны заготовки в сечении с координатой  $a$ , где приложена сила резания

$$k = \frac{1}{\rho} = W''(a) = 0,$$

где  $\rho$  – радиус кривизны;  $W''(a)$  – вторая производная от перемещения (кривизна). Для нежесткой заготовки, закрепленной в центрах (шарнирно) при медленно движущейся силе резания найдены такие  $M_1$  и  $M_2$ , которые обеспечивают минимум квадратичного деформационного критерия качества (рис. 2).

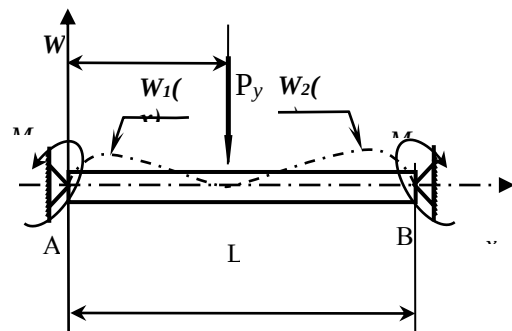


Рис. 2 – Схема обрабатываемой нежесткой заготовки

**Пример.** Для заготовки управляющие воздействия  $M_1$  и  $M_2$  найдены на с использованием квадратичного критерия качества:

$$I = \left[ \int_0^a W_1(x) dx \right]^2 + \left[ \int_a^l W_2(x) dx \right]^2 = \min.$$

Применен метод начальных параметров. Из условия статического равновесия реакция левой опоры:

$$R_a = \frac{M_1 - M_2 + P_y(L-a)}{L}.$$

Кинематический начальный параметр  $\theta_0$  (угол поворота) определяется из условия  $W_B = 0$ :

$$\theta_0 = -\frac{1}{6} \frac{(M_1 - M_2 + P_y(L-a))L^2 - P_y(L-a)^3}{EJ}.$$

Выражение для перемещения сечения с координатой  $x$ :

$$w(x) = -\frac{((M_1 - M_2 + P_y(L-a))L^2 - 3M_1L^2 - P_y(L-a)^3)x}{EJ} + \frac{1}{6} \frac{(M_1 - M_2 + P_y(L-a))x^3 - \frac{1}{2}M_1x^2}{EJ} - \frac{1}{6} \frac{P_y(L-a)^3}{EJ}.$$

Из необходимых условий минимума квадратичного критерия получены управления:

$$M_1 = \frac{1}{2} \frac{P_y a (2L^3 - 3L^2 a + a^3)}{L^3},$$

$$M_2 = \frac{1}{2} \frac{(3L^2 - 4La + a^2)P_y a^2}{L^3}.$$

Важно отметить, что в управлениях отсутствует перемена знака на всем участке обработки нежесткой детали, что упрощает практическую реализацию таких управлений.

И в настоящее время продолжают оставаться актуальными задачи компенсации упругих перемещений и непрерывного управляемого деформирования нежестких заготовок в процессе точения (с целью снижения погрешностей изготовления деталей). Теоретический и практический интерес

представляют задачи поиска компенсации упругих перемещений или непрерывного оптимального управления деформированием в процессе обработки нежестких заготовок фасонного профиля с использованием технологически обоснованных критериев качества и ограничений.

### Управление колебаниями (гашение колебаний) нежесткой заготовки

Задача управления по быстрому движению формулируется как задача об оптимальном подавлении колебаний нежесткой заготовки, возникающих в процессе токарной обработки.

Постановка задачи состоит в следующем. Нежесткая заготовка (как системы с одной либо с бесконечным числом степеней свободы), описывается дифференциальным уравнением; задан критерий оптимальности (критерий быстродействия, квадратичный интегральный, либо алгебраический критерий).

Необходимо: найти такое управление, которое переводит заготовку из исходного состояния, определяемого начальными условиями, в такое конечное состояние, при котором снижаются (либо полностью подавляются) колебания.

Управление по быстрому движению используется в виде сосредоточенного воздействия, прикладываемого, например, по середине заготовки. Снижение уровня колебаний среднего сечения приводит к снижению колебаний и того сечения, в котором непосредственно приложена сила резания.

Структурная схема замкнутой линейной системы управления перемещениями нежесткой заготовки в общем случае включает: объект управления (нежесткая заготовка); ПИД – регулятор, обеспечивающий непрерывное устранение упругим перемещением сечения заготовки (управление по медленному движению); обратную связь, которая реализует управление по быстрому движению (подавление колебаний, обусловленные процессом обработки).

Замкнутая система устойчива (корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части) в области задаваемых технологических параметров процесса токарной обработки нежестких валов.

При использовании обратной связи существенно снижается влияние случайных возмущений, повышается качество работы системы.

Если объединить процессы резания и трения (с использованием единой характеристики взаимодействия режущего инструмента с нежесткой деталью) и под упругой системой в связи с весьма малой жесткостью обрабатываемой детали подразумевать саму деталь, то обобщенную замкнутую динамическую систему обработки нежесткой детали можно представить в виде блок-схемы.

Созданы новые модели и исследована комбинированная система автоматического управления (в Simulink) упругими перемещениями обрабатываемого нежесткого вала (устранение перемещений заготовки по направлению силы резания, обусловленных медленно движущейся вдоль заготовки силой резания – управление по медленному движению) и сложным характером колебаний, возникающих в процессе обработки (управление по быстрому движению).

Управление по медленному движению основано на принципе разомкнутого программного управления. Управление по быстрому движению построено на принципе обратной связи.

Уточнен механизм образования погрешности при обработке нежестких валов с последующим обоснованием деформационных критериев оптимальности в задачах синтеза управлений. Для нежестких заготовок с различными законами изменения поперечного сечения найдены силовые управления деформированием, в том числе – управления, обеспечивающие минимум энергозатрат на непрерывное деформирование.

Оценено влияние изменения параметров технологической системы на устойчивость процесса обработки нежестких заго-

товок. Предложена также методика определения параметров эквивалентного импульсного воздействия, обеспечивающего реализацию непрерывных управлений деформированием заготовок.

Показана эффективность снижения упругих перемещений в процессе обработки нежестких заготовок переменного сечения при совместном использовании управлений положением равновесия (программное управление) и колебаниями (управление с обратной связью).

### Заключение

1. Погрешности детали, обусловленные изгибными деформациями нежесткой заготовки при токарной обработке, в первом приближении пропорциональны упругим перемещениям самой заготовки.

2. Многолетние теоретические и экспериментальные исследования подтверждают снижение погрешности обработки при управляемом уменьшении перемещения сечения заготовки с координатой силы резания.

Показано, что существует широкий класс оптимальных управлений деформированием нежестких заготовок при автоматической токарной обработке для снижения погрешности изготовления деталей.

3. Подход в описании механизма образования бочкообразности может быть использован и при описании причины возникновения погрешности формы типа седловидности. В этом случае в модели расчета необходимо учесть упругие перемещения опор.

### Список литературы

1. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.
2. Бохонский А.И. Построение управлений деформациями твердых тел при медленно движущейся внешней нагрузке. Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1989. – № 10. – С. 124 – 128.
3. Бохонский А.И., Вахмянин А.Н. Управление деформированием нежестких деталей при токарной обработке. Монография. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 1999. – 240 с.
4. Бохонский А.И., Шмидт Л.А. Компенсация перемещений и управление деформированием заго-

товок при токарной обработке. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – 109 с.

5. Подпоркин В.Г. Обработка нежестких деталей. – М. – Л.: Машгиз. 1959. – 150 с.

6. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. М.: Машиностроение. 1968. – 221 с.

7. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.

8. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.

9. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.

10. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

## References

1. Bazrov B.M. Tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya samopodnastraivayush-chih stankov. – М.: Mashinostroyeniye, 1978. – 248 s.

2. Bohonskiy A.I. Postroyeniye upravleniy deformatsiyami tverdykh tel pri medlenno dvizhushchey

vneshej nagruzke. Izv. VUZov. Mashinostroyeniye, 1989. – № 10. – S. 124 – 128.

3. Bohonskiy A.I., Vahmyanin A.N. Upravleniye de-formirovaniem nezhestkih detalej pri tokarnoy obrabotke. Monografiya. – Sevasto-pol': Izd-vo SevNTU, 1999. – 240 s.

4. Bohonskiy A.I., Shmidt L.A. Kompensatsiya pere-meshcheniy i upravleniye deformirovaniem zagotovok pri tokarnoy obrabotke. – Novokuzneck: NIC MS, 2018. – 109 s.

5. Podporkin V.G. Obrabotka nezhestkih de-talej. – М. – Л.: Mashgiz. 1959. – 150 s.

6. Kolev K.S., Gorchakov L.M. Tochnost' obrabotki i rezhimy rezaniya. М.: Mashinostroyeniye. 1968. – 221 s.

7. Bohonskiy A.I. Optimal'noye upravleniye pere-nosnym dvizheniem deformiruemykh ob'ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bohonskiy, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevskiy; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – 296 s.

8. 15. Bohonskiy A.I. Variatsionnoye i reversion-noye ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskiy, N.I. Varminskaya; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 212 s.

9. 16. Bohonskiy A.I. Reversionnyy princip optimal'nosti / A.I. Bohonskiy. – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-М, 2016. – 174 s.

10. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

УДК 621. 923

## СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫЙ СИНТЕЗ РЕЗЬБОНАРЕЗНЫХ СТАНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ

А.О. Харченко<sup>1</sup>, А.А. Харченко<sup>1</sup>, Е.А. Владецкая<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

### Аннотация

В статье представлены результаты исследований в направлении совершенствования технологического оборудования для внутренней резьбообработки деталей в условиях гибкого автоматизированного производства. Создание эффективного автоматизированного технологического оборудования – резьбонарезных станочных модулей является актуальной задачей, решение которой связано с получением значительного экономического эффекта за счет повышения производительности обработки и улучшения качества изделий. Представлена укрупненная блок-схема последовательности решения задачи синтеза, выявления элементов и узлов, существенно снижающих надежность и переналаживаемость системы, последующего совершенствования элементов технологической системы оборудования. После заполнения морфологической матрицы для системы резьбонарезного станочного модуля выполняется синтез вариантов его структуры. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации.

**Ключевые слова:** резьбообработка, внутренние резьбы малых диаметров, резьбонарезной станочный модуль, технологическая система модуля, морфологическая матрица, комплексный критерий качества, метчик, бесстружечный метчик, комбинированный метчик.

## STRUCTURAL-COMPOSITIONING SYNTHESIS OF THREADING MACHINE MODULES

А.О. Kharchenko<sup>1</sup>, А.А. Kharchenko<sup>1</sup>, Е.А. Vladetskaya<sup>1</sup><sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

The article presents the results of research in the direction of improving technological equipment for internal threading of parts in a flexible automated production. The creation of effective automated technological equipment - thread-cutting machine modules is an urgent task, the solution of which is associated with obtaining a significant economic effect by increasing processing productivity and improving the quality of products. An enlarged block diagram of the sequence of solving the synthesis problem, identifying elements and nodes that significantly reduce the reliability and adaptability of the system and subsequent improvement of the elements of the technological system of equipment is presented. After filling in the morphological matrix for the system of the threading machine module, the synthesis of variants of its structure is performed. The measures taken make it possible to solve the synthesis problem at the level of structural and layout optimization.

**Keywords:** threading, internal threads of small diameters, threading machine module, technological system of the module, morphological matrix, complex quality criterion, tap, chipless tap, combination tap.

Создание эффективного технологического оборудования для автоматизированной резьбообработки является актуальной задачей, решение которой связано с получением значительного экономического эффекта за счет повышения производительности обработки и улучшения качества изделий.

Разнообразие профилей резьбы в деталях, различные требования к точности и шероховатости обработки, а также характер производств и оборудования предопределяют большое количество способов резьбообразования [1, 2, 3].

Основное деление в технологии изготовления резьб производится по расположению резьбовой поверхности в детали: резьбы внутренние и наружные. По диаметру: резьбы малых диаметров (до 6 мм), средних диаметров (6...60 мм), больших диаметров (60...600 мм).

На рис. 1 показано количественное соотношение деталей с наружной и внутренней резьбой, а также типов деталей с внутренней резьбой. Число деталей с наружной резьбой превышает число деталей с внутренней резьбой в основном из-за того, что для большинства корпусных деталей требуется при сборке большое количество деталей с наружной резьбой. Внутренняя резьба имеется практически в деталях всех типов. Главным образом она сосредоточена в крепежных деталях, однако значительная часть приходится также на детали типа корпусов и полых цилиндров. Эти детали являются более сложными, более трудоемкими и дорогими в обработке, так как часто требуют использования сложного и дорогостоящего оборудования.

Резьбы малых диаметров применяют в основном в приборостроении и электротехнической промышленности, резьбы средних диаметров – в автомобилестроении, станкостроении, авиастроении, сельскохозяйственном машиностроении, резьбы больших диаметров – в тяжелом машиностроении, нефтяной и газовой промышленности.

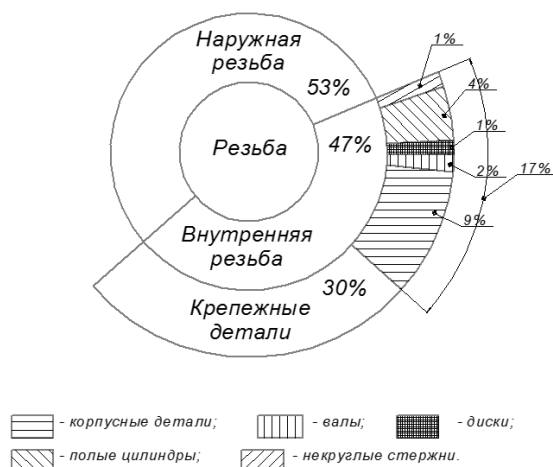


Рис. 1. Процентное соотношение количества деталей с наружными и внутренними резьбами

Удельный вес трудоемкости нарезания внутренних резьб М2...М6 составляет 8...12% от общей трудоемкости технологических процессов механической обработки деталей и особенно велик при обработке корпусных деталей, дисков, цилиндров, фланцев с весьма значительным числом резьбовых отверстий.

Анализ процесса [2, 3, 4] свидетельствует о том, что при обработке внутренних резьб малых диаметров во всех типах производства преобладает метод обработки резьб метчиками. Разнообразие метчиков и постоянное их совершенствование свидетельствуют об отсутствии приемлемых вариантов для работы в условиях автоматизированного производства с широкой номенклатурой деталей из черных, цветных металлов и различных труднообрабатываемых сплавов.

В связи с большим распространением и высокой трудоемкостью обработки внутренних резьб малых диаметров, большая часть которых образуется методом резания метчиками, низкой производительностью и большим процентом брака, проблема автоматизации этого процесса в мелкосерийном и серийном производствах очень важна.

В связи с этим синтез технологических элементов резьбонарезных станочных модулей является актуальной задачей, для выполнения которой необходимо на основе научного подхода оптимизировать варианты структуры модулей, оценивать эффективность принимаемых решений на уровне новых требований, предъявляемых к проектированию с учетом опыта, накопленного исследователями и разработчиками в этой области.

Резьбонарезной станочный модуль обладает всеми признаками технических динамических систем. К таким признакам относятся следующие: а) модуль состоит из отдельных взаимодействующих подсистем; б) состояние подсистем и модуля в целом изменяется во времени; в) каждая подсистема и модель в целом характеризуется текущим состоянием, историей развития [5].

В связи с этим задача синтеза оптимальных структур резьбонарезного станочного

модуля может рассматриваться как задача общей теории синтеза технических систем. В то же время она имеет и ряд специфических особенностей, связанных с требованиями, предъявляемыми к модулю, с особенностями объектов производства, физических процессов, протекающих в системе, что требует структуризации задачи, выбора методов ее решения, определения критериев эффективности, установления взаимосвязей между подсистемами [6].

В общем случае задача синтеза оптимальной системы состоит в определении принципов  $\hat{P}$  её построения, множества элементов  $\hat{C} = \{\hat{c}_i, i = 1, \dots, n\}$  системы, множества связей  $\hat{\theta}$  между элементами  $\hat{C}$  и функций  $\hat{q} = \{q_1, \dots, q_n\}$  таких, что обеспечивается экстремум показателей  $q_0$ , то есть:

$$(\hat{P}, \hat{C}, \hat{\theta}, \hat{q}) = \arg \text{ext}_{q_0}(P, C, \theta, q). \quad (1)$$

Принцип построения  $\hat{P}$  системы резбонарезного модуля (как и любого модуля вообще) заключается в следующем: модуль представляет собой систему с открытыми границами, когда число составляющих системы и их вариантов заранее неизвестно,

переход от одного варианта к другому дискретен и трудно формализуем (не может

быть выражен функционально); множество вариантов может быть установлено только на основах априорной информации, опыта проектировщика; часть вариантов остается за границами требуемых технических решений [6, 7]. Управление системой осуществляется от других иерархически более общих технических систем; методы и средства управления модулей могут быть заранее заданы; управляющие сигналы на изменение объекта производства и связанная с этим перестройка подсистем выполняется в заранее известные случайные интервалы времени.

С учетом рассмотренных особенностей синтез структур может быть выполнен на основе использования методов структурной и параметрической оптимизации (синтеза) технических систем. На рис. 2 представлена укрупненная блок-схема последовательности решения задачи синтеза, выявления «слабых» мест (уязвимых элементов и узлов, существенно снижающих надежность и перенадежность системы) и совершенствования элементов технологической системы оборудования.

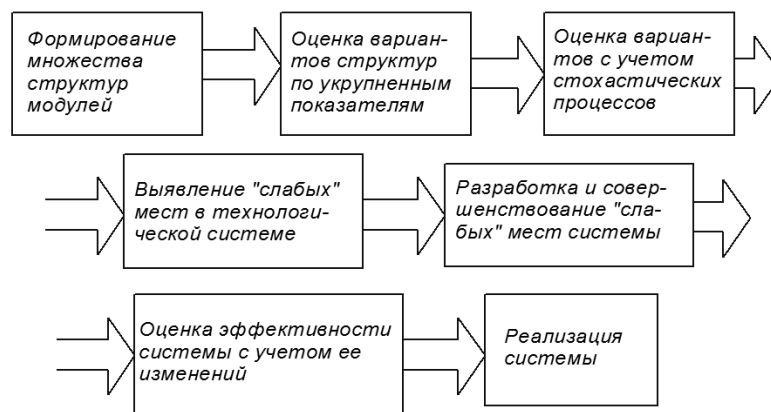


Рис. 2. Блок-схема последовательности решения задач синтеза модуля

На первом этапе производится формирование множества структур. На втором – оценка вариантов структур по укрупненным показателям, на третьем этапе выполняется оценка вариантов с учетом стохастических процессов. Четвертый этап синтеза сопро-

вождается выявлением «слабых» (уязвимых по показателям надежности) мест в технологической системе модуля, пятый – разработкой и совершенствованием этих «слабых» мест. На шестом этапе осуществляется оценка эффективности системы с учетом ее

изменений, а на последнем – реализация системы.

Для определения совокупности технологических элементов оборудования для обработки  $\hat{C} = \{\hat{c}_i, i=1, \dots, n\}$ , связей  $\hat{\theta}$  между ними и функцией  $\{\hat{q}_i, i=1, \dots, n\}$  выполним декомпозицию оборудования на подсистемы: станок (С), приспособление-загрузочное устройство (П), инструмент (И), заготовка

(З), процесс резьбообработки (рис. 3).

Процесс резьбообработки в свою очередь может быть разбит на подсистемы второго уровня: съём металла, деформация металла, а также подсистемы третьего уровня: износ зубьев, силы резания, депланация инструмента, шероховатость поверхности, геометрия резьбы, тепловые процессы.

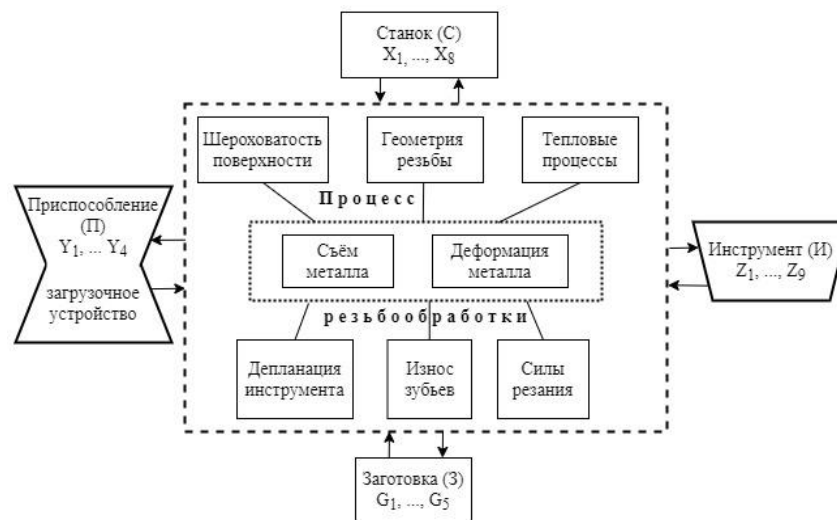


Рис. 3. Структурная схема технологической системы резьбонарезного станочного модуля

На первом этапе решения задачи синтеза резьбонарезного станочного модуля при формировании множества структур будем учитывать в качестве признаков и характеристик технологических элементов их различное влияние на выходные показатели как технологических систем, так и процесса резьбообработки. При этом целесообразно применить аппарат морфологического анализа.

Однако, для нашего случая этот метод в чистом виде использовать невозможно из-за очевидных недостатков его последнего этапа – выбора рационального варианта, при котором не учитываются реальные условия функционирования оборудования. К недостаткам метода также относится то, помимо реально возможных комбинаций характеристик встречается большое количество несовместимых вариантов, объективная оценка эффективности которых затруднена. Поэтому морфологический анализ целесообразно использовать в качестве аппарата на

первых двух этапах синтеза для формирования множества структур и оценки их вариантов по укрупненным показателям. Воспользуемся построением морфологической матрицы (таблица 1).

После заполнения морфологической матрицы для системы модуля выполняется синтез вариантов его структуры. Характеристики узлов подсистем выбираем в качестве основы для построения графов [8], иллюстрирующих множество возможных вариантов технологических элементов модуля, которое равно числу путей в графе. С учетом большого количества вариантов синтез решения осуществляем, начиная с выбора вариантов основных элементов, включая все более и более существенные признаки [8, 9]. Кроме того, следует руководствоваться списком технических требований, определяющихся в первую очередь свойствами такого технологического элемента, как заготовка.

Таблица 1. Морфологическая матрица  
резьбонарезного станочного модуля

| Подсистема модуля – СТАНОК (С)             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Узел (признак) подсистемы                  | Характеристика узла. (признака)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 1. Привод главного движения – $X_1$        | 1.1 Электрический – $X_{11}$ ;<br>1.2 Пневматический – $X_{12}$ ;<br>1.3 Гидравлический – $X_{13}$ ;<br>1.4 Комбинированный – $X_{14}$                                                                                                                                                                                                                |
| 2. Привод подач – $X_2$                    | 2.1 Вид подачи: а) равномерная – $X_{21}$ ; б) прерывистая – $X_{22}$<br>2.2 Способ подачи: а) самозатягиванием – $X_{23}$ ; б) принудительная – $X_{24}$<br>2.3 Способ переналадки: а) смена копира – $X_{25}$ ; б) настройка гитары – $X_{26}$ ; в) программное управление – $X_{27}$                                                               |
| 3. Привод вспомогательных движений – $X_3$ | 3.1 Ручной $X_{31}$ ; 3.2 Автоматический – $X_{32}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4. Направляющие элементы – $X_4$           | 4.1 Качения – $X_{41}$ ; 4.2 Скольжения – $X_{42}$ ; 4.3 Гидростатические – $X_{43}$                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 5. Шпиндельный узел – $X_5$                | 5.1 Наличие предохранительного устройства: а) есть – $X_{51}$ ; б) нет – $X_{52}$                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 6. Револьверная головка – $X_6$            | 6.1 Количество позиций: а) четыре – $X_{61}$ ; б) шесть – $X_{62}$ ; в) восемь – $X_{63}$                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 7. Многошпиндельная головка – $X_7$        | 7.1 Количество шпинделей: а) два – $X_{71}$ ; б) три – $X_{72}$ ; в) четыре – $X_{73}$ ; г) более 4 – $X_{74}$<br>7.2 Расположение шпинделей: а) рядное – $X_{75}$ ; б) диаметрально – $X_{76}$ ; в) сложное – $X_{77}$<br>7.3 Настройка межцентрового расстояния: а) ручная – $X_{78}$ ; б) механическая – $X_{79}$ ; в) автоматическая – $X_{7,10}$ |
| 8. Стол – $X_8$                            | 8.1 Неподвижный – $X_{81}$<br>8.2 Подвижный: а) продольный – $X_{82}$ ; б) круглый – $X_{83}$                                                                                                                                                                                                                                                         |

Продолжение табл. 1

| Узел (признак) подсистемы                 | Характеристика узла. (признака)                                                                                                                 |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Подсистема модуля – ПРИСПОСОБЛЕНИЕ (П)    |                                                                                                                                                 |
| 1. Для зажима деталей $Y_1$               | 1.1 Механизированное – $Y_{11}$ ;<br>1.2 Автоматическое – $Y_{12}$                                                                              |
| 2. Для позиционирования деталей – $Y_2$   | 2.1 Вручную – $Y_{21}$ ;<br>2.2 Автоматически – $Y_{22}$                                                                                        |
| 3. Накопитель – $Y_3$                     | 3.1 Палетный – $Y_{31}$ ;<br>3.2 Магазинный – $Y_{32}$ ;<br>3.3 Бункерный – $Y_{33}$ ;<br>3.4 Лотковый – $Y_{34}$                               |
| 4. Манипулятор – $Y_4$                    | 4.1 Есть – $Y_{41}$<br>4.2 Нет – $Y_{42}$                                                                                                       |
| Подсистема модуля – ИНСТРУМЕНТ (И)        |                                                                                                                                                 |
| 1. Количество инструментов – $Z_1$        | 1.1 Один – $Z_{11}$ ;<br>1.2 Несколько – $Z_{12}$                                                                                               |
| 2. Тип инструмента – $Z_2$                | 2.1 Метчик – $Z_{21}$ ;<br>2.2 Бесстружечный – $Z_{22}$ ;<br>2.3 Комбинированный – $Z_{23}$ ;                                                   |
| 3. Схема заборной части – $Z_3$           | 3.1 Профильная – $Z_{31}$ ;<br>3.2 Генераторная – $Z_{32}$ ;<br>3.3 Прогрессивная – $Z_{33}$                                                    |
| 4. Геометрия зубьев рабочей части – $Z_4$ | 4.1 Без затылования – $Z_{41}$ ;<br>4.2 С затылованием: а) радиальным – $Z_{42}$ ; б) осевым – $Z_{43}$ ; в) многозаходными резьбами – $Z_{44}$ |
| 5. Расположение рабочих вершин – $Z_5$    | 5.1 Равномерное – $Z_{51}$ ;<br>5.2 Шахматное – $Z_{52}$ ;<br>5.3 Сложное – $Z_{53}$                                                            |
| 6. Количество рабочих граней – $Z_6$      | 6.1 Три – $Z_{61}$ ;<br>6.2 Четыре – $Z_{62}$ ;<br>6.3 Шесть – $Z_{63}$                                                                         |
| 7. Стружечные канавки – $Z_7$             | 7.1 Прямые – $Z_{71}$ ;<br>7.2 Винтовые – $Z_{72}$ ;<br>7.3 Криволинейные – $Z_{73}$                                                            |
| 8. Материал рабочей части – $Z_8$         | 8.1 Инструментальная сталь – $Z_{81}$ ;<br>8.2 Быстрорежущая сталь – $Z_{82}$ ;<br>8.3 Твердый сплав – $Z_{83}$                                 |

Продолжение табл. 1

| Подсистема модуля – ЗАГОТОВКА (З)         |                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Размер резьбы – $G_1$                  | 1.1 Менее M2 – $G_{11}$ ;<br>1.2 M2...M4 – $G_{12}$ ;<br>1.3 M3...M6 – $G_{13}$                                                                                                       |
| 2. Тип заготовки – $G_2$                  | 2.1 Крепежная – $G_{21}$ ;<br>2.2 Корпусная – $G_{22}$ ;<br>2.3 Диски, цилиндры – $G_{23}$ ;<br>2.4 Прочие – $G_{24}$                                                                 |
| 3. Количество резьбовых отверстий – $G_3$ | 3.1 Одно – $G_{31}$ ;<br>3.2 Несколько:<br>а) рядное расположение – $G_{32}$ ;<br>б) диаметрально – $G_{33}$ ;<br>в) сложное – $G_{34}$                                               |
| 4. Класс точности – $G_4$                 | 4.1 Точный – 4Н, 5Н – $G_{41}$ ;<br>4.2 Средний – 5Н, 6Н – $G_{42}$ ;<br>4.3 Грубый – 7Н, 7Г, 8Н – $G_{43}$                                                                           |
| 5. Материал – $G_5$                       | 5.1 Сталь конструкционная – $G_{51}$ ;<br>5.2 Стали жаропрочные и нержавеющей – $G_{52}$ ;<br>5.3 Цветные сплавы – $G_{53}$ ;<br>5.4 Прочие труднообрабатываемые материалы – $G_{54}$ |

Методика поиска оптимальных решений состоит в выделении наиболее приемлемых узлов подсистем и их признаков (вид, свойство) для создания новой системы. Выделенные варианты обеспечивают правильное функционирование системы, но имеют различные характеристики (надежность, гибкость, стоимость, массу и габаритные показатели).

По формуле для определения комплексного критерия качества вычисляется суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур.

В безразмерном виде комплексный критерий качества  $K$  для каждой из подсистем модуля можно представить в виде [5, 11]:

$$K = I - \sum_{i=1}^n (I - K_i) / n,$$

где  $K_i$  – качественные показатели, характеризующие возможность станка (приспособления, инструмента) адаптироваться к

изменению номенклатуры деталей и к различным производственным ситуациям;  $n$  – число качественных показателей.

На этапе структурно-компоновочного синтеза можно ограничиться применением вышеуказанного качественного критерия.

Для обработки типовой цилиндрической детали, на торцах которой диаметрально расположено по четыре резьбовых отверстия M4...M6, рациональные варианты технологических элементов модуля можно представить в виде следующих структур (таблица 2).

Выбранные структурные варианты станка C1 и C2 (с качественными показателями  $K_c = 0,8$ ) содержат узлы и обладают характеристиками, позволяющими создавать модули на агрегатной основе, т.е. с электрическим приводом главного движения, приводом равномерной принудительной осевой подачи и автоматическим приводом вспомогательных перемещений, а также с продольным столом. Многошпиндельная головка в структуре C1 – нерегулируемая, с жестким межцентровым расстоянием, а в структуре C2 – настройка межцентрового расстояния каждого шпинделя производится вручную.

Структурный вариант приспособления П1 (с качественным показателем  $K_{п1} = 1,0$ ) включает в себя автоматические устройства зажима и позиционирования деталей, а также манипулятор для загрузки и разгрузки заготовок.

Структуры И1, И2, И3 инструмента имеют принципиальные конструктивные отличия прежде всего по способу формообразования резьбы: И1 – метчик, образующий резьбу методом снятия стружки (Z21); И2 – бесстружечный метчик, работающий методом пластического деформирования (Z22); И3 – комбинированный метчик (Z23), сочетающий резание и пластическое деформирование. Остальные признаки выбраны с учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований авторов. Однако в условиях гибкого автоматизированного производства широкий диапазон обрабатываемых материалов с непредсказуемой периодичностью их смены затрудняет процесс выбора однозначно оптимальной структуры

инструмента. Для выявления из выбранных рациональных вариантов конструкций, способных эффективно обрабатывать резьбы в деталях из различных материалов, необходим комплекс дополнительных экспериментальных исследований.

Схемы рациональных структурных вариантов выбранных технологических элементов (С1 и С2, П1, И1, И2, И3) с учетом перспективы создания модулей из серийно выпускаемого оборудования путем модернизации и расширения его технологических возможностей, используя оценки качества элементов, позволяют представить шесть структурных вариантов:

- 1) С<sub>1</sub> → П<sub>1</sub> → И<sub>1</sub>;      4) С<sub>2</sub> → П<sub>1</sub> → И<sub>1</sub>;
- 2) С<sub>1</sub> → П<sub>1</sub> → И<sub>2</sub>;      5) С<sub>2</sub> → П<sub>1</sub> → И<sub>2</sub>;
- 3) С<sub>1</sub> → П<sub>1</sub> → И<sub>3</sub>;      6) С<sub>2</sub> → П<sub>1</sub> → И<sub>3</sub>.

Таким образом, морфологический анализ позволил выявить из сформированного множества резбонарезных модулей несколько вышеуказанных рациональных структур. Для полной информации и объективной оценки предпочтительного для использования в условиях ГПС варианта необходим учет стохастических процессов, происходящих в системе в реальных условиях функционирования [12, 13]. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации. В дальнейших разработках для реализации этапа параметрического синтеза потребуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований реальных конструкций модулей.

Таблица 2. Рациональные структурные варианты элементов резбонарезных станочных модулей

| Сим-вол        | Структура                                                                                                                                                                                                                      | Схема |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| С <sub>1</sub> | $X_{11} \rightarrow \begin{matrix} X_{21} \\ X_{24} \\ X_{25} \end{matrix} \rightarrow X_{32} \rightarrow$ $\rightarrow X_{42} \rightarrow X_{52} \rightarrow \begin{matrix} X_{73} \\ X_{76} \end{matrix} \rightarrow X_{82}$ |       |

Продолжение табл.2

| Сим-вол        | Структура                                                                                                                                                                                                             | Схема |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| С <sub>2</sub> | $X_{11} \rightarrow \begin{matrix} X_{21} \\ X_{24} \\ X_{25} \end{matrix} \rightarrow X_{32} \rightarrow$ $\rightarrow X_{52} \rightarrow \begin{matrix} X_{73} \\ X_{76} \\ X_{78} \end{matrix} \rightarrow X_{82}$ |       |
| П <sub>1</sub> | $Y_{12} \rightarrow Y_{22} \rightarrow Y_{34} \rightarrow Y_{41}$                                                                                                                                                     |       |
| И <sub>1</sub> | $Z_{12} \rightarrow Z_{21} \rightarrow Z_{32} \rightarrow Z_{42} \rightarrow$ $\rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{71} \rightarrow Z_{82}$                                                           |       |
| И <sub>2</sub> | $Z_{12} \rightarrow Z_{21} \rightarrow Z_{32} \rightarrow Z_{42} \rightarrow$ $\rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{74} \rightarrow Z_{82}$                                                           |       |
| И <sub>3</sub> | $Z_{12} \rightarrow Z_{23} \rightarrow Z_{32} \rightarrow Z_{42} \rightarrow$ $\rightarrow Z_{53} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{73} \rightarrow Z_{82}$                                                           |       |

Такие исследования позволяют определить уязвимые по показателям надежности технологические элементы, усовершенствование которых приведет в конечном итоге к реализации наиболее эффективной системы резбонарезного станочного модуля.

### Список литературы

1. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
2. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
3. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкогабаритных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
4. Мерзлов А.В. Анализ особенностей формообразования внутренних резьб М2...М6 / А.В. Мерзлов, А.О. Харченко // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (20 - 23 мая 2019 г.), Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2019. – С. 94-96.
5. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48-52.
6. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкий, С.И. Рощупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.

7. Харченко А.О. Патентование и изобретательство. Практикум / А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. – М.: Центркаталог, 2018. – 112 с.

8. Харченко А.О. Структурно-компоновочный синтез подсистем модулей для внутренней резьбообработки / А.О. Харченко, А.А. Харченко. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2020. № 4-2 (342). – С.85-94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.

9. Пуш В.Э. Автоматические станочные системы / В.Э. Пуш, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.

10. Харченко А.О. Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие / А.О. Харченко – М.: Вузковский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 260 с.

11. Мерзлов А.В. Разработка критерия эффективности при оптимизации структур станочных модулей / А.В. Мерзлов, А.О. Харченко, А.А. Харченко // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (20-23 мая 2019 г.), Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2019. – С. 97-100.

12. Нахапетян Е.Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Е.Г. Нахапетян. – М.: Наука, 1985. – 224 с.

13. Долгин В.П. Надежность технических систем: учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М.: Вузковский учебник: ИНФРА-М, 2015. – 167 с.

## References

1. Matveyev V.V. Narezaniye tochnykh rez'b (Precision thread cutting) / V.V. Matveyev. – М.: Mashinostroyeniye, 1978. – 88 s.

2. Frumin Yu.L. Vysokoproizvoditel'nyy rez'boobrazuyushchiy instrument (High-performance thread-forming tool) / Yu.L. Frumin. – М.: Mashinostroyeniye, 1977. – 183 s.

3. Bratan S.M. Povysheniye tochnosti formoobrazovaniya melkorazmernykh rez'b metchikami v al'yuminiyevykh splavakh: monografiya (Improving the accuracy of forming small-sized threads with taps in aluminum alloys) / S.M. Bratan, F.N. Kanareyev, P.A. Novikov, A.O. Kharchenko. – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 164 s.

4. Merzlov A.V. Analiz osobennostey formoobrazovaniya vnutrennikh rez'b M2...M6 (Analysis of the features of the formation of internal threads M2 ... M6) / A.V. Merzlov, A.O. Kharchenko // Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik statey Vse-

rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (20-23 maya 2019 g.), Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2019. – S. 94-96.

5. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. –7(2), P. 48-52.

6. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov: praktikum (Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines: practical) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – М.: Tsentrkatolog, 2018. – 144 s.

7. Kharchenko A.O. Patentovedeniye i izobretatel'stvo. Praktikum (Patenting and invention. Workshop) / A.O. Kharchenko, A.G. Karlov, A.A. Kharchenko, K.N. Osipov. – М.: Tsentrkatolog, 2018. – 112 s.

8. Kharchenko A.O. Strukturno-komponovochnyy sintez podsystem moduley dlya vnutrenney rez'boobrabotki (Structural-layout synthesis of subsystems of modules for internal thread processing) / A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko. – Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2020. № 4-2 (342). – С.85-94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.

9. Push V.E. Avtomaticheskiye stanochnyye sistemy (Automatic machine tools) / V.E. Push, V.L. Sosenkin. – М.: Mashinostroyeniye, 1982. – 319 s.

10. Kharchenko A.O. Metalloobrabatyvayushchiye stanki i oborudovaniye mashinostroitel'nykh proizvodstv (Metalworking machines and equipment engineering industries): Ucheb. posobiye / A.O. Kharchenko – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 260 s.

11. Merzlov A.V. Razrabotka kriteriya effektivnosti pri optimizatsii struktur stanochnykh moduley (Development of a performance criterion for the optimization of structures of machine modules) / A.V. Merzlov, A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko // Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik statey Vse-rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (20 - 23 maya 2019 g.), Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2019. – S. 97-100.

12. Nakhapetyan Ye.G. Diagnostirovaniye oborudovaniya gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva (Diagnosing Equipment for Flexible Automated Production) / Ye.G. Nakhapetyan. – М.: Nauka, 1985. – 224 s.

13. Dolgin V.P. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem (Reliability of technical systems) / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko. – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2015. – 167 s..

УДК 621.7

## ЗАВИСИМОСТЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ УСЛОВИЙ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ 45

И.Э. Теминдаров<sup>1</sup>, В.В. Скакун<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ ВО «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь, Российская Федерация

### Аннотация

В данной статье рассмотрено влияние параметров режимов резания и применяемых технологических сред на шероховатость обработанной поверхности при фрезеровании стали 45. Собран экспериментальный стенд для определения силовых характеристик процесса резания. В результате исследований были определены оптимальные условия для снижения шероховатости обработанной поверхности при концевом фрезеровании стали 45 с добавлением смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

**Ключевые слова:** режимы резания, шероховатость поверхности, фрезерование, СОТС, обрабатываемая поверхность.

## DEPENDENCE OF SURFACE ROUGHNESS ON THE CUTTING CONDITIONS DURING MILLING STEEL 45

I.E. Temindarov<sup>1</sup>, V.V. Skakun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fevzi Yakubov Crimean engineering and pedagogical university, Simferopol, Russian Federation

### Abstract

This article discusses the influence of the parameters of cutting conditions and the applied technological environments on the roughness of the machined surface when milling steel 45. An experimental stand is assembled to determine the power characteristics of the cutting process. As a result of the research, the optimal conditions for reducing the roughness of the machined surface during end milling of steel 45 were determined with the addition of lubricating and cooling technological media (LSTM).

**Keywords:** cutting modes, surface roughness, milling, coolant, machined surface.

На сегодняшний день, при обработке металлов резанием, производственные машиностроительные предприятия, используют разнообразные виды смазочно-охлаждающие технологические среды, и их количество каждый год увеличивается [1-6, 11]. Применение технологических сред в механической обработке – одно из направлений увеличивающей работоспособность инструмента и качества обработанного материала. Все виды СОТС, должны удовлетворять высоким эксплуатационным требованиям, несмотря на конкретные области их применения [5, 7, 12].

По сравнению с сухой обработкой, использование СОТС для изучения влияния режимов резания на шероховатость

обработанной поверхности является основой для формулирования заданных условий обработки с применением СОТС [7, 9, 14].

Шероховатость обработанной поверхности считается одним из основополагающих факторов, характеризующих работоспособность инструмента, что является важным фактором для работы в условиях чистовой и получистовой обработки [8, 9, 13, 15]. Следовательно, распространенной проблемой на производстве является использование оптимальных условий параметров режимов резания для определения воздействия на шероховатость поверхности с применением различных технологических сред в процессе фрезерования.

Целью данной статьи является определение влияния режимов резания на шероховатость поверхности с применением различных СОТС при фрезеровании стали 45.

Для решения поставленных задач был принят обрабатываемый материал (сталь 45) и быстрорежущий инструмент (сталь Р6М5) с постоянной геометрией и приработанный согласно установленным режимам

предварительной приработки для каждой из исследуемых сред.

Экспериментальные исследования проводились на вертикально-фрезерном станке модели 6Р11, на базе которого был разработан экспериментальный стенд, включающий применение ТМС, соединенный с компрессором SATVA OL 102 (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальный стенд

После анализа экспериментальных данных, были проведены графические зависимости шероховатости поверхности от подачи на зуб при фрезеровании стали 45 (рис. 2). На данной зависимости наблюдается, что наибольшая шероховатость поверхности проявляется при сухой обработке и в присутствии И-20А и ее значение зависит от глубины резания.

С применением МР-99, в составе которой содержится растительное масло, и при использовании рапсового масла влияние на шероховатость поверхности незначительно. Это связано с различными протеканиями контактных процессов при применении СОТС, содержащими растительные масла.

Модельное исследование влияния скорости резания в диапазоне от 28 м/мин до 48 м/мин демонстрируют, что скорость резания не проявляет значимого воздействия на изменение шероховатости, кроме обработки в сухую (рис. 3).

При сухой обработке с увеличением скорости резания и  $t = 0,4$  мм наблюдается интенсивное снижение шероховатости в 3,5

раза и составляет  $R_a = 9,85$  мкм для  $V = 28$  м/мин и  $R_a = 2,75$  мкм для  $V = 45$  м/мин., а при фрезеровании с  $t = 1,2$  мм в данном диапазоне скоростей от 28 м/мин до 48 м/мин наблюдается повышение шероховатости в 1,2 раза.

Наиболее спорным и максимальным влияние при сухой обработке на шероховатость поверхности оказывает глубина резания (рисунок 4). Так при сухой обработке с увеличением глубины резания от 0,4 мм до 1 мм и подаче  $S_z = 0,15$  мм/зуб шероховатость увеличивается в 1,4 раза с значениями  $R_a \approx 9,4$  мкм и  $R_a \approx 13$  мкм, а затем до 2 мм уменьшается в 4,7 раза с значениями  $R_a = 0,63$  мкм. Такие же значения шероховатости приводятся при подаче  $S_z = 0,3$  мм/зуб, но при этом пике наибольшего значения шероховатости сдвигается в сторону меньших глубин резания.

Шероховатость увеличивается с увеличением глубины резания от 0,4 мм до 2 мм. Так при  $S = 0,15$  мм/зуб она увеличивается более чем в 2,3 раза, что составляет по  $R_a - 4,4$  мкм и 10,3 мкм, а при

$S = 0,3$  мм/зуб – 1,8 раза, с 5,15 мм до 9,19 мм. При этом её значение в диапазоне изменения подач от 0,15 - 0,3 мм/зуб при  $t =$

0,4 – 0,8 мм незначительно, а при  $t = 1,2$  – одинаково.

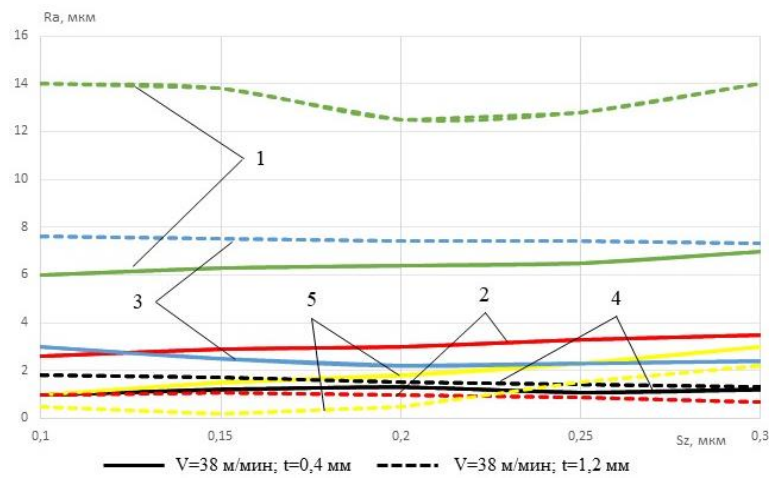


Рис. 2. Зависимости  $R_a$  от  $S_z$ : 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло, 3 – И-20А, 4 – ОМ, 5 – МР-99.

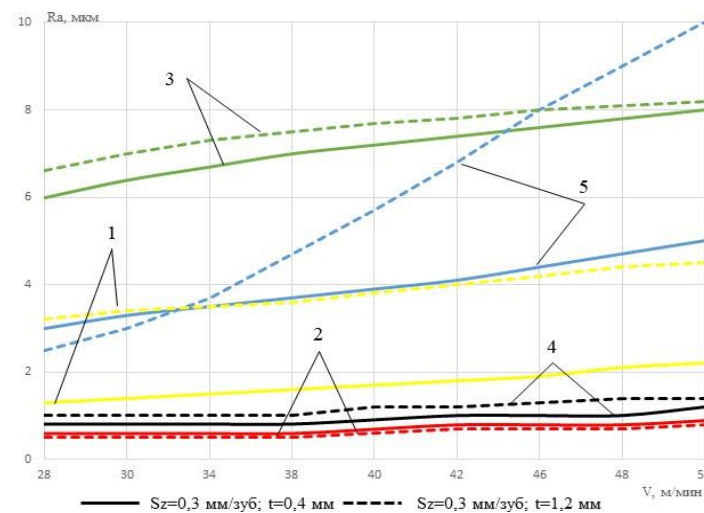


Рис. 3. Зависимости  $R_a$  от  $V$ : 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло, 3 – И-20А, 4 – ОМ, 5 – МР-99.

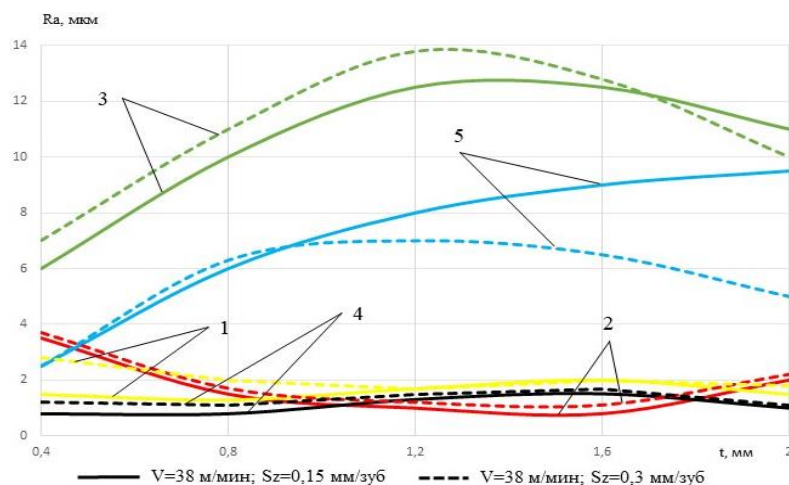


Рис. 4. Зависимости  $R_a$  от  $t$ : 1 – сухая обработка, 2 – рапсовое масло, 3 – И-20А, 4 – ОМ, 5 – МР-99.

## Выводы

В результате проведенных комплексных исследований на основе моделирования по экспериментальным данным приработанного в различных средах можно прийти к заключению, что скорость резания на шероховатость обработанной поверхности в среде рапсового масел и МР-99 при фрезеровании стали 45 не оказывает существенного влияния. В этом случае шероховатость поверхности зависит от взаимообусловленного влияния подачи и глубины резания.

В исследуемом диапазоне подач, глубина резания при использовании растительных масел и МР-99 содержащих в сравнении с сухой обработкой и И-20 оказывает значительно меньшее влияние на изменение шероховатости. При малых подачах ( $S_z = 0,15$  мм/зуб) в присутствии МР-99 глубина в исследуемом диапазоне не оказывает влияния на шероховатость поверхности. В присутствии рапса шероховатость поверхности с увеличением глубины резания до 2,0 мм увеличивается в 1,3 раза (0,7 мкм – 1,0 мкм), а в присутствии ОМ в 1,7 раза (0,9 мкм – 1,18 мкм). С увеличением подачи на зуб ( $S_z = 0,3$  мм/зуб) при использовании рапсового масла в качестве СОТС, влияние глубины резания на значение шероховатости увеличивается в 2,8 раза (0,97 мкм – 2,74 мкм).

## Список литературы

1. Ваниев Э.Р. Повышение эффективности концевое фрезерование нержавеющей сталей применением модифицированной смазочно-охлаждающей технологической среды / Э.Р. Ваниев, В.В. Скакун, Э.Ш. Джемилов, И.Д. Абдулкеримов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – М, 2021. – № 7 (736). – С. 10-18.
2. Skakun V. Experimental evaluation of the efficiency of lubricating process media during the running-in period of a metal-cutting tool / V. Skakun, R. Dzhe-malyadinov, I. Abdulkarimov // IOP Conference Series: Materials Science And Engineering. – Yalta : 2020. – P. 119-126.
3. Алиев А.И. Влияние экологически чистых технологических сред на контактные характеристики процесса резания в начальный период эксплуатации / А.И. Алиев, Р.М. Джемалидинов, В.В. Скакун, И.В. Харченко // Вестник Ростовского Государственного

Университета Путей Сообщения. – Ростов-на-Дону, 2019. – № 1(73). – С. 8-14.

4. Якубов Ф.Я. Экспериментальная оценка эффективности смазывающих технологических сред в периоде приработки металлорежущего инструмента / Ф.Я. Якубов, Ч.Ф. Якубов, В.В. Скакун // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. – Тула, 2016. – № 8-1. – С. 246-253.

5. Якубов Ч.Ф. Моделирование стойкости фрезы из Р6М5 при измерении условий ее предварительной приработки и дальнейшей эксплуатации при фрезеровании стали 12Х18Н10Т / Ч.Ф. Якубов, Э.Р. Ваниев // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львов, Вид-во Львівської політехніки, 2012. – №746. – С. 207–210.

6. Yakubov C. Improving material cutting by application of natural origin oil / C. Yakubov, R. Dzhe-malyadinov, V. Skakun // Matec Web Of Conferences. – Sevastopol : 2018. – P. 132-139.

7. Теминдаров И.Э. Теоретический анализ использования различных СОТС при фрезеровании конструкционных углеродистых сталей / И.Э. Теминдаров, Э.Э. Сеитметов, Э.Р. Ваниев // BONUM INITIUM. – Симферополь, 2018. – № 7(15). – С. 91-99.

8. Драгина О.Г. Методика исследования влияния СОТС на шероховатость поверхности и на силы резания при концевом фрезеровании / О.Г. Драгина, П.С. Белов, А.А. Бровченко, Н.А. Иванова // Наука и Бизнес: Пути Развития. – Тамбов, 2020. – №11(113). – С. 16-19.

9. Бровченко А.А. Определение оптимальных режимов резания при концевом фрезеровании с использованием различных видов СОТС / А.А. Бровченко, П.С. Белов, О.А. Бровченко, Д.Ю. Никифоров, О.Г. Драгина, Н.А. Иванова // Актуальные Научные Исследования в Современном Мире. – Переяслав-Хмельницкий, 2021. – №4-2(72). – С. 70-75.

10. Муравина О.М. Применение метода группового учета аргументов для анализа петрофизических данных / О.М. Муравина, И.А. Пономаренко, М.В. Минц // Вестник Камчатской Региональной Организации Учебно-Научный Центр. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – № 3(51). – С. 5-15.

11. Germashev A.I. Influence of the cut axial depth on surface roughness at high-speed milling of thin-walled workpieces / A.I. Germashev, V.A. Logominov, S.I. Dyadya, Y.V. Kozlova, V.A. Krishtal // Наука и Техника. – Минск, 2021. – № 2(20). – С. 127-131.

12. Николаев А. Ю. Повышение эффективности подготовки производства при высокоскоростном фрезеровании деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов / А.Ю. Николаев, А.В. Савилов // Наукоемкие Технологии в Машиностроении. – Брянск, 2021. – № 2(116). – С. 36-40.

13. Ваниев Э.Р. Вопросы методологии исследования влияния СОТС на процесс резания / Э.Р. Ваниев, Ю.И. Бесарабев, П.В. Скрынник // Вісник Сумсько-

го державного університету: Серія «Технічні науки». 2010. – №4. – С. 70–76.

14. Алиев А.И. Повышение работоспособности сложнопрофильного режущего инструмента за счет применения технологических сред растительного происхождения: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Алиев Азиз Ибрагимович. – Х., 2011. – 145 с.

15. Григорьев С.Н., Гуринов В.Д., Туманов А.А. Двухкомпонентный динамометр для измерения составляющих силы резания при фрезеровании // Сборник трудов 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения» (ТМ-2011). Брянск : 2011. – С. 36-38.

## References

1. Vaniyev E.R. Povysheniye effektivnosti kontsevo go frezerovaniya nerzhavayushchikh staley primeneniye modifitsirovannoy smazochno-okhlazhdayushchey tekhnologicheskoy sredy / E.R. Vaniyev, V.V. Skakun, E.S.H. Dzhemilov, I.D. Abdulkirimov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – M., 2021. – № 7 (736). – S. 10-18.

2. Skakun V. Experimental evaluation of the efficiency of lubricating process media during the running-in period of a metal-cutting tool / V. Skakun, R. Dzhemalyadinov, I. Abdulkirimov // IOP Conference Series: Materials Science And Engineering. – Yalta : 2020. – R. 119-126.

3. Aliyev A.I. Vliyaniye ekologicheskikh sred na kontaktnyye kharakteristiki protsess rezaniya v nachal'nyy period ekspluatatsii / A.I. Aliyev, R.M. Dzhemalyadinov, V.V. Skakun, I.V. Kharchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – Rostov-na-Donu, 2019. – № 1(73). – S. 8-14.

4. Yakubov F.YA. Eksperimental'naya otsenka effektivnosti smazyvayushchikh tekhnologicheskikh sred v periode prirabotki metallovezhushchego instrumenta / F.YA. Yakubov, CH.F. Yakubov, V.V. Skakun // Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskoye Nauki. – Tula, 2016. – № 8-1. – S. 246-253.

5. Yakubov CH.F. Modelirovaniye stoykosti frezy iz R6M5 pri izmerenii usloviy yeye predvaritel'noy prirabotki i dal'neyshey ekspluatatsii pri frezerovani stali 12KH18N10T / CH.F. Yakubov, E.R. Vaniyev // Visnik Natsional'nogo universitetu «L'viv's'ka politekhnika». Optimizatsiya virobnykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol' u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni. – L'viv, Vid-vo L'viv's'koї politekhniki, 2012. – №746. – S. 207–210.

6. Yakubov C. Improving material cutting by application of natural origin oil / C. Yakubov, R. Dzhemalyadinov, V. Skakun // Matec Web Of Conferencesyu. – Sevastopol : 2018. – R. 132-139.

7. Temindarov I.E. Teoreticheskiy analiz ispol'zovaniya razlichnykh SOTS pri frezerovani konstruksionnykh uglerodistykh staley / I.E. Temindarov, E.E. Seitmemetov, E.R. Vaniyev // BONUM INITIUM. – Simferopol', 2018. – № 7(15). – S. 91-99.

8. Dragina O.G. Metodika issledovaniya vliyaniya SOTS na sherokhovatost' poverkhnosti i na sily rezaniya pri kontsevom frezerovani / O.G. Dragina, P.S. Belov, A.A. Brovchenko, N.A. Ivanova // Nauka i Biznes: Puti Razvitiya. – Tambov, 2020. – №11(113). – S. 16-19.

9. Brovchenko A.A. Opredeleniye optimal'nykh rezhimov rezaniya pri kontsevom frezerovani s ispol'zovaniem razlichnykh vidov SOTS / A.A. Brovchenko, P.S. Belov, O.A. Brovchenko, D.YU. Nikiforov, O.G. Dragina, N.A. Ivanova // Aktual'nyye Nauchnyye Issledovaniya v Sovremennom Mire. – Pereyaslav-Khmel'nitskiy, 2021. – №4-2(72). – S. 70-75.

10. Muravina O.M. Primeneniye metoda gruppovogo ucheta argumentov dlya analiza petrofizicheskikh dannyykh / O.M. Muravina, I.A. Ponomarenko, M.V. Mints // Vestnik Kamchatskoy Regional'noy Organizatsii Uchebno-Nauchnyy Tsentr. – Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2021. – № 3(51). – S. 5-15.

11. Germashev A.I. Influence of the cut axial depth on surface roughness at high-speed milling of thin-walled workpieces / A.I. Germashev, V.A. Logominov, S.I. Dyadya, Y.V. Kozlova, V.A. Krishtal // Nauka i Tekhnika. – Minsk, 2021. – № 2(20). – S. 127-131.

12. Nikolayev A. YU. Povysheniye effektivnosti podgotovki proizvodstva pri vysokoskorostnom frezerovani detaley iz vysokoprochnnykh alyuminiyevykh splavov / A.YU. Nikolayev, A.V. Savilov // Naukoyemkiye Tekhnologii v Mashinostroyenii. – Bryansk, 2021. – № 2(116). – S. 36-40.

13. Vaniyev E.R. Voprosy metodologii issledovaniya vliyaniya SOTS na protsess rezaniya / E.R. Vaniyev, YU.I. Besarabets, P.V. Skrynnik // Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu: Seriya «Tekhnichni nauki». 2010. – №4. – S. 70–76.

14. Aliyev A.I. Povysheniye rabotosposobnosti slozhnoprofil'nogo rezhushchego instrumenta za schet primeneniya tekhnologicheskikh sred rastitel'nogo proiskhozhdeniya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01 / Aliyev Aziz Ibrakhimovich. – KH., 2011. – 145 s.

15. Grigor'yev S.N., Gurin V.D., Tumanov A.A. Dvukhkomponentnyy dinamometr dlya izmereniya sostavlyayushchikh sily rezaniya pri frezerovani // Sbornik trudov 3-y mezhduar. nauch.-tekhn. konf. «Modernizatsiya mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii na nauchnykh osnovakh tekhnologii mashinostroyeniya» (TM-2011). Bryansk : 2011. – S. 36-38.

УДК 621.454

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ С РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕНТОЧНОМ РОТАЦИОННОМ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ3-1

С.М. Братан<sup>1</sup>, Т.В. Стадник<sup>1</sup>, А.С.Часовитина<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

### Аннотация

В настоящее время титановые сплавы достаточно широко применяются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях машиностроения. Однако, характерная особенность титановых сплавов – очень низкая теплопроводность способствует большому тепловыделению в зоне обработки и является основным фактором, влияющим на обработку резанием. В статье рассмотрено получение расчетной зависимости для определения температуры при ленточном ротационном шлифовании титанового сплава ВТ3-1, устанавливающей взаимосвязь температуры с режимами резания и позволяющей управлять параметрами теплового процесса путем увеличения одновременно работающих зерен за счет увеличения площади обхвата шлифовальной лентой заготовки.

**Ключевые слова:** ленточное ротационное шлифование, сила резания, абразивная лента, температура в зоне обработки

## THE RELATIONSHIP OF TEMPERATURE WITH CUTTING MODES DURING BELT ROTARY GRINDING OF TITANIUM ALLOY VT3-1

S.M. Bratan<sup>1</sup>, T.V. Stadnik<sup>1</sup>, A.S.Chasovitina<sup>1</sup><sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

Currently, titanium alloys are widely used as structural materials in various branches of mechanical engineering. However, a characteristic feature of titanium alloys is that very low thermal conductivity contributes to a large heat release in the processing zone and is the main factor affecting cutting processing. The article considers obtaining a calculated dependence for determining the temperature during belt rotary grinding of titanium alloy VT3-1, which establishes the relationship of temperature with cutting modes and allows controlling the parameters of the thermal process by increasing the simultaneously working grains by increasing the girth area of the workpiece with a grinding belt.

**Keywords:** rotary belt grinding, cutting force, abrasive belt, temperature in the processing area

В настоящее время в качестве конструкционных материалов находят широкое применение титановые сплавы [1-4]. По удельной прочности титановые сплавы превосходят все ныне применяемые технические материалы. Они теплоустойчивы, коррозионностойки на воздухе, в морской воде, в кислотах и щелочах. Эти свойства способствуют все большему применению титановых сплавов в качестве конструкционных материалов в различных отраслях машиностроения [5-7]. Однако титановые сплавы, обладая ценными конструкционными свойствами, характеризуются низкой обрабатываемостью резанием, которая связана со

специфическими физико-химическими свойствами и особенностями структуры сплавов. Наиболее характерная особенность титана – очень низкая теплопроводность. Это способствует большому тепловыделению в зоне обработки и является основным фактором, влияющим на обработку резанием. Еще одно характерное свойство титана и его сплавов является их химическая активность в условиях повышенных температур. С повышением температуры титан энергично соединяется с водородом (водяной пар), кислородом и азотом воздуха. Интенсивное поглощение этих газов начинается соответственно с 300, 500, 600°C. В результате этого существенно

ухудшаются механические свойства: значительно возрастает твердость и резко снижается пластичность, что приводит к охрупчиванию сплава [8].

Тепловыделение при ленточном шлифовании металлов и сплавов значительно меньше, чем при шлифовании абразивными кругами. Однако температуры в зоне резания достаточно высокие и могут вызывать существенное изменение физико-механических свойств поверхностного слоя обрабатываемых деталей и приводить к появлению шлифовочных дефектов [9-10].

Для обработки длинномерных осесимметричных деталей, где вращение обрабатываемой детали невозможно или затруднительно, таких как прокат, проволока, трубные заготовки, прямолинейной и криволинейной формы наиболее оптимальной схемой обработки является способ ротационного ленточного шлифования [11-14]. При ленточном ротационном шлифовании будут другие условия теплообмена в зоне резания, поэтому температурные закономерности, полученные при шлифовании абразивными кругами, не могут быть полностью перенесены на процесс обработки лентами. Важно иметь расчетные зависимости, устанавливающие взаимосвязь температуры с режимами резания при ленточном ротационном шлифовании, что является целью данной статьи.

Для решения задач по моделированию температур при ленточном ротационном шлифовании используются математические зависимости, предложенные Якимовым А.В. и Сипайловым В.А.

Анализ схемы ленточного шлифования показывает, что контакт ленты с обрабатываемой деталью в основном полосовой. Он является тепловым источником процесса. Плотность теплового потока распределена по поверхности контакта, поэтому можно использовать схему подвижного бесконечного длинного поверхностно-полосового источника тепла. Ленточному шлифованию без охлаждения соответствует тепловая схема (рис. 1), в которой по поверхности  $x=0$

полубесконечного тела 1 в положительном направлении оси  $Z$  движется бесконечно протяженный вдоль оси  $Y$  полосовой источник тепла 2 шириной  $L_l=2h$ .

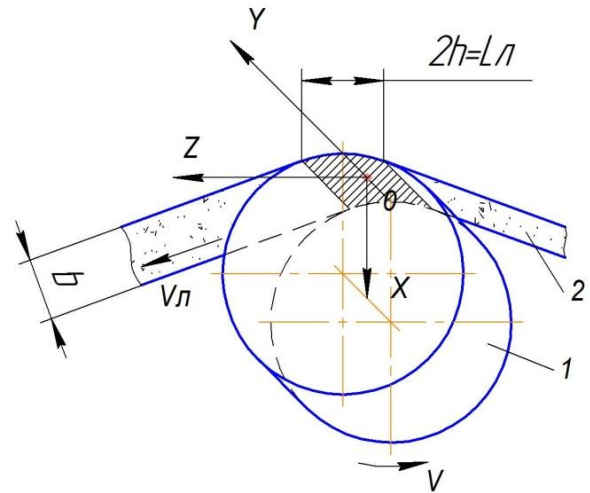


Рис. 1 Расчетная схема при ленточном ротационном шлифовании:  
1 – заготовка; 2 – абразивная лента

Как правило, при ленточном шлифовании ширина ленты больше абразивных кругов и ширина  $b$  намного больше длины  $L_l$  контакта ленты с деталью. Поэтому при  $b \gg L_l$  предположение о бесконечно длинной полосе источника тепла вполне допустимо. Начало системы координат  $OXYZ$  связано с центром теплового источника. Предполагается, что тепло выделяется с постоянной интенсивностью  $q$  в единицу времени на единице площади поверхности резания, и потеря тепла с поверхности  $A$  ( $x=0$ ) не происходит. Отсюда двумерное установившееся распределение температуры при шлифовании определяется [15]:

$$T = \frac{2qa}{\pi\lambda\nu} \int_{Z-H}^{Z+H} e^{-u} K_0(\sqrt{x^2 + u^2}) du, \quad (1)$$

где  $q$  – плотность теплового источника, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/(м<sup>2</sup>·с·град);  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$x = X \frac{v}{2a}$  – безразмерная глубина;

$H = h \frac{v}{2a}$  безразмерная половина ширины

источника тепла;  $u = (z - z') \frac{x}{2a}$  переменная

интегрирования;  $2h$  – ширина зоны контакта;  $v$  – скорость движения теплового источника (скорость вращения планшайбы);

$K_0(x^2 + u^2)^{0.5}$  – функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

Для  $x=0$  при  $H>5$  максимальную температуру при шлифовании в месте контакта источника тепла с деталью в точке  $z=-H$  (задняя кромка источника тепла) можно определять по уравнению:

$$T_{max} = \frac{4qa}{\pi\lambda v} \sqrt{\pi H}, \quad (2)$$

а среднюю температуру в зоне контакта по уравнению:

$$T_{cp} = \frac{2,67qa}{\pi\lambda v} \sqrt{\pi H}. \quad (3)$$

Безразмерная половина ширины  $H$  источника тепла равна для ленточного ротационного шлифования с учетом угла охвата абразивной лентой заготовки:

$$H = \frac{\pi d \varepsilon v}{1440a} \quad (4)$$

Плотность теплового потока  $q$  определяется как частное от деления общего количества тепла  $Q$ , выделяемого в процессе шлифования в единицу времени, на площадь контакта [15]:

$$q = \frac{Q}{F_k} = \frac{P_z v_{\pi}}{F_k}, \quad (5)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $F_k$  – площадь контакта шлифовальной ленты и заготовки, м<sup>2</sup>;  $v_{\pi}$  – скорость абразивной ленты, м/с.

Площадь контакта шлифовальной ленты и заготовки при ленточном ротационном шлифовании определяется по формуле:

$$F_k = \frac{\pi d \varepsilon B}{360},$$

где  $d$  – диаметр заготовки, м;  $B$  – ширина шлифовальной ленты, м;  $\varepsilon$  – угол охвата шлифовальной лентой заготовки, град.

Подставив в уравнения (1-3) уравнения (5) и половину ширины источника  $H$  (4), получим:

1. Уравнение распределения температуры при ленточном ротационном шлифовании:

$$T = \frac{730a P_z v_{\pi}}{\lambda v d B \varepsilon} \int_{z-H}^{z+H} e^{-u} K_0(\sqrt{x^2 + u^2}) du \quad (6)$$

2. Максимальную температуру:

$$T_{max} \begin{matrix} x=0 \\ z=-H \\ H>5 \end{matrix} = \frac{121 P_z v_{\pi}}{\lambda B} \sqrt{\frac{a}{v d \varepsilon}} \quad (7)$$

3. Среднюю температуру по контакту ленты:

$$T_{cp} \begin{matrix} x=0 \\ z=-H \\ H>5 \end{matrix} = \frac{81 P_z v_{\pi}}{\lambda B} \sqrt{\frac{a}{v d \varepsilon}} \quad (8)$$

Для практических расчетов распределения температуры при ленточном ротационном шлифовании уравнение (6) можно представить в виде:

$$T = \frac{730a P_z v_{\pi}}{\lambda v d B \varepsilon} (I_{(z+H)} - I_{(z-H)}) = \frac{730a P_z v_{\pi}}{\lambda v d B \varepsilon} \theta,$$

где

$$I_{(z+H)} = \int_0^{z+H} e^{-u} K_0(\sqrt{x^2 + u^2}) du$$

$$I_{(z-H)} = \int_{z-H}^0 e^{-u} K_0(\sqrt{x^2 + u^2}) du$$

$\theta = I_{(z+H)} - I_{(z-H)}$  — относительная температура — переменная величина, зависящая от координат поля  $x$  и  $z$ ;

Значение интеграла  $I_{(z)}$  для расчета распределения температуры на поверхности контакта абразивная лента — деталь приведены в табл. 1.

Коэффициент распределения температуры: для принятых условий и режимов шлифования (постоянная величина):

$$A = \frac{730aP_z v_{\text{л}}}{\lambda v d B \varepsilon}$$

Необходимо иметь функциональную зависимости для расчета тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , которая может быть получена экспериментально.

Исследования проводили специально созданной установке, схема которой изображены на рис. 2 на образцах круглого сечения, диаметром 10-50 мм, нормальной точности изготовления, длиной 3000 мм) из титанового сплава ВТЗ-1.

Для измерения сил резания применяли динамометрические центра (передний и задний), снабженные проволочными тензорезисторами (датчиками сопротивления) между которыми закреплена заготовка.

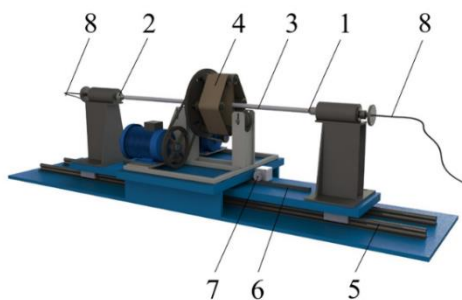


Рис.2. Схема установки для измерения сил резания: 1, 2 — передний и задний тензометрические центра соответственно; 3 — заготовка; 4 — установка для ротационного ленточного шлифования; 5 — направляющие станины; 6 — зубчатая рейка; 7 — шаговый электродвигатель; 8 — провода, ведущие к прибору для измерения сил резания

Таблица 1. Значение интеграла  $I_{(z)}$  для расчета распределения температуры на поверхности контакта абразивная лента — деталь

| $z$  | $I_{(z)}$ | $z$  | $I_{(z)}$ |
|------|-----------|------|-----------|
| -20  | -         | -0,4 | -0,969    |
|      | 10,277    |      |           |
| -15  | -8,789    | -0,3 | -0,794    |
| -10  | -7,024    | -0,2 | -0,595    |
| -9   | -6,623    | -0,1 | -0,357    |
| -8   | -6,199    | 0,00 | 0,0000    |
| -7   | -5,748    | +0,1 | +0,328    |
| -6   | -5,265    | +0,2 | +0,505    |
| -5   | -4,741    | +0,3 | +0,626    |
| -4   | -4,164    | +0,4 | +0,713    |
| -3   | -3,513    | +0,5 | +0,778    |
| -2   | -2,750    | +0,6 | +0,827    |
| -1,9 | -2,665    | +0,7 | +0,864    |
| -1,8 | -2,573    | +0,8 | +0,892    |
| -1,7 | -2,489    | +0,9 | +0,914    |
| -1,6 | -2,397    | +1,0 | +0,932    |
| -1,5 | -2,302    | +1,1 | +0,945    |
| -1,4 | -2,205    | +1,2 | +0,956    |
| -1,3 | -2,105    | +1,3 | +0,965    |
| -1,2 | -2,001    | +1,4 | +0,972    |
| -1,1 | -1,893    | +1,5 | +0,977    |
| -1,0 | -1,781    | +1,6 | +0,981    |
| -0,9 | -1,664    | +1,7 | +0,984    |
| -0,8 | -1,541    | +1,8 | +0,987    |
| -0,7 | -1,412    | +1,9 | +0,989    |
| -0,6 | -1,275    | +2,0 | +0,991    |
| -0,5 | -1,128    | +2,1 | +1,000    |

Два динамометрических центра позволяют фиксировать силы резания в процессе шлифования при любом положении шлифовальной ленты относительно обрабатываемой детали. Проволочные датчики, наклеенные на вертикальных плоскостях переднего и заднего центров, соединены в один мост и используются для измерения силы  $P_y$  (рис. 3). Датчики, наклеенные на горизонтальных плоскостях обоих центров, используются для измерения силы  $P_z$ .

Схема измерения включает динамометрические центра, усилитель, аналого-цифровой преобразователь ЛА-50USB, подключенный к персональному компьютеру по известной методике. Тарировка тензометрических центров осуществлялась статическим нагружением. Масштаб тарировки определялся аппроксимацией по методу наименьших квадратов. Тарировочный график имел линейный характер. Общая погрешность при

использовании данной методики составляет 10%.

Продольное перемещение динамометрических центров, с закрепленной между ними заготовкой, в процессе измерения осуществляется по направляющим на станине посредством зубчатой рейки и шагового электродвигателя (рис. 2).

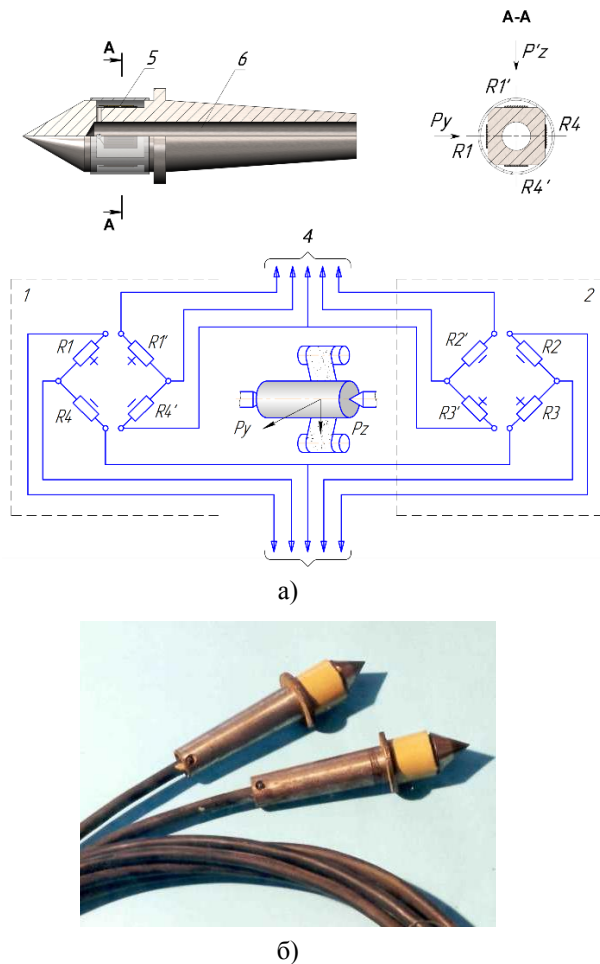


Рис. 3. Тензометрические центра а)- схема включения проводочных датчиков сопротивления для измерения сил  $P_y$  и  $P_z$ . (1 — передний центр; 2 — задний центр; 3 — провода к прибору для измерения силы  $P_y$ , 4 — провода к прибору для измерения силы  $P_z$ ; 5 — датчики; 6 — отверстие для вывода проводов); б)-фотография тензометрических центров

Согласно анализа литературных данных [16] для моделирования значений составляющей силы резания  $P_z$  от переменных факторов: радиальной составляющей силы резания —  $P_y$ , скорости ленты —  $V_l$  и зернистости абразивной ленты —  $X_H$  была принята регрессионная зависимость степенного вида:

$$P_z = C_{Pz} \cdot P_y^{\alpha_1} \cdot V_l^{\alpha_2} \cdot X_H^{\alpha_3}, \quad (9)$$

где  $C_{Pz}$  — коэффициент;  $P_y$  — радиальная составляющая силы резания;  $V_l$  — скорость ленты;  $X_H$  — зернистость абразивной ленты;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — показатели степени.

После логарифмирования данное уравнение 9 принимает вид:

$$\ln P_z = \ln C + \ln P_y + \ln V_l + \ln X_H$$

Проверка гипотезы адекватности линейной модели при выражении результатов эксперимента выполняется с помощью полинома:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3,$$

где  $y$  — это  $\ln P_z$ ;  $x_1, x_2, x_3$  — кодированные значения факторов;  $b_1, b_2, b_3$  — коэффициенты параметров модели;  $b_0$  — свободный член.

Кодированные значения факторов определяли по выражению:

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_i^e)}{\ln \tilde{x}_i^e - \ln \tilde{x}_i^n} + 1,$$

где  $x_i$  — кодированное значение  $i$ -того фактора;  $\tilde{x}_i$  — натуральное значение  $i$ -того фактора;  $\tilde{x}_i^e$  — натуральное значение верхнего уровня  $i$ -того фактора;  $\tilde{x}_i^n$  — натуральное значение нижнего уровня  $i$ -того фактора.

Таблица 2 — Кодирование переменных факторов

| Уровень факторов | $P_y, \text{Н}$ |                   | $V_l, \text{м/с}$ |                   | $X_H$ |                   |
|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|
|                  | $x_1$           | $\ln \tilde{x}_1$ | $x_2$             | $\ln \tilde{x}_2$ | $x_3$ | $\ln \tilde{x}_3$ |
| Верхний (+1)     | 50,00           | 3,91              | 25,00             | 3,22              | 40,00 | 3,69              |
| Нижний (-1)      | 30,00           | 3,40              | 10,00             | 2,30              | 10,00 | 2,30              |

Перерасчет факторов:

$$x_1 = \frac{2(\ln \bar{x}_1 - 3,91)}{3,91 - 3,4} + 1 = 3,922 \ln \bar{x}_1 - 14,3$$

$$x_2 = \frac{2(\ln \bar{x}_2 - 3,22)}{3,22 - 2,30} + 1 = 2,174 \ln \bar{x}_2 - 6,0$$

$$x_3 = \frac{2(\ln \bar{x}_3 - 3,69)}{3,69 - 2,3} + 1 = 1,4 \ln \bar{x}_3 - 4,309$$

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена зависимость тангенциальной составляющей силы резания от скорости движения ленты, ее зернистости и радиальной составляющей силы резания:

$$P_z = 5,7 \cdot P_y^{0,784} \cdot V_l^{0,03} \cdot X_H^{-0,612} \quad (10)$$

Таким образом, получена зависимость по определению тангенциальной составляющей силы резания при шлифовании титанового сплава ВТЗ-1, на основании которой можно оценить влияние отдельных параметров на величину силы резания.

Данная зависимость показывает, что наибольшее влияние на величину силы  $P_z$  оказывают радиальная сила  $P_y$  и размер зерна абразивного инструмента  $X_H$ .

Подставив в уравнения (6) уравнение (10), получаем:

$$T = \frac{4161aP_y^{0,784}V_l^{1,03}X_H^{-0,612}}{\lambda v d B \varepsilon} \times \int_{Z-H}^{Z+H} e^{-u} K_0(\sqrt{x^2 + u^2}) du$$

Таким образом, получена расчетная зависимость, устанавливающая взаимосвязь температуры с режимами резания при ленточном ротационном шлифовании, позволяющая управлять параметрами теплового процесса путем увеличения одновременно работающих зерен за счет увеличения площади обхвата шлифовальной лентой заготовки.

## Список литературы

1. Климов В.Н. Современные авиационные конструкционные сплавы: учеб. пособие / В.Н. Климов, Д.М. Козлов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 40 с.
2. Халов М.О. Перспективы применения сплавов с памятью на основе никелида титана в устройствах аэрокосмического назначения / Электронный журнал «Труды МАИ». – 2010. – № 55. – С. 17.
3. Горынин И. В. Титан в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. – М: Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. Томашов Н.Д. Титан и коррозионностойкие сплавы на его основе. – М.: Металлургия, 1985. – 81 с.
5. Бубнов В.А. Титан и его сплавы в машиностроении / В.А Бубнов, А.Н. Князев // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 3 (42). – С. 92-96.
6. Егорова Ю.Б. Титановые сплавы для автомобилестроения / Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, С.Б. Белова, Е.Н. Егоров // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 1137-1146.
7. Александров В.К. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар и др. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
8. Паньков Л.А. Ленточное шлифование высокопрочных материалов. / Л.А. Паньков, Н.В. Костин. – М.: Машиностроение, 1978. – 126 с.
9. Федоров Д.Г. Шлифование титановых сплавов. краткий литературный обзор / Д.Г. Федоров, Д.В. Евдокимов, А.А. Пластинин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 1 (81). – С. 129-133.
10. Носенко В.А. Влияние среды на показатели процесса шлифования сталей и титановых сплавов инструментом из корунда и карбида кремния / В.А. Носенко, В.Е. Пузырькова, Н.Д. Сердюков, Д.С. Слепцов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 8 (255). – С. 34-37.
11. Братан С.М. Баланс перемещений в технологической системе при ленточном ротационном шлифовании/ С.М. Братан, Т.В. Стадник, А.Г. Колесов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – Вып. 8., ч. 1. – С. 270-275.
12. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process Bratan, S., Kolesov, A., Roshchupkin, S., Stadnik, T. MATEC Web of Conferences, 2017, 129, 01078
13. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys Bratan, S., Stadnik, T., Golovin, V. Materials Today: Proceedings, 2021, 38, pp. 2013–2018
14. Шияев С.А. Анализ конструктивных и технологических параметров устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования на основе исследований динамики относительного движения

абразивной ленты / С.А. Шилиев С.А., А.Г. Иванов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 6. – С. 12–20.

15. Якимов Я.В. Оптимизация процесса шлифования – М: Машиностроение, 1975. – 176 с.

16. Шилиев С.А. Исследование технологических показателей процесса ротационного ленточного шлифования и получение математических зависимостей для количественного анализа условий резания/ С.А. Шилиев// Вестник Ижевского государственного технического университета. –2008. – № 2 (38). – С. 23-26.

## References

1. Klimov V.N. Sovremennye aviatsionnye konstruktsionnye splavy: ucheb. posobie / V.N. Klimov, D.M. Kozlov. – Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017. – 40 s.

2. Khalov M.O. Perspektivy primeneniia splavov s pamiat'iu na osnove nikelida titana v ustroistvakh aerokosmicheskogo naznacheniia / Elektronnyi zhurnal «Trudy MAI». –2010. – № 55.– S. 17.

3. Gorynin I. V. Titan v mashinostroenii / I.V. Gorynin, B.B. Chechulin. – М: Mashinostroenie, 1990. – 400 s.

4. Tomashov N.D. Titan i korrozionnostoikie splavy na ego osnove. – М.: Metallurgiiia, 1985. — 81 s.

5. Bubnov V.A. Titan i ego splavy v mashinostroenii / V.A. Bubnov, A.N. Kniazev // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2016. – № 3 (42). – S. 92-96.

6. Egorova Iu.B. Titanovye splavy dlia avtomobilestroeniia / Iu.B. Egorova, L.V. Davydenko, S.B. Belova, E.N. Egorov // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. – 2013. – № 3. – S. 1137-1146.

7. Aleksandrov V.K. Polufabrikaty iz titanovykh splavov/ V.K. Aleksandrov, N.F. Anoshkin, G.A. Bochvar i dr. – М.: Metallurgiiia, 1979. – 512 s.

8. Pan'kov L.A. Lentochnoe shlifovanie vysokoprochnykh materialov. / L.A. Pan'kov, N.V. Kostin. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 126 s.

9. Fedorov D.G. Shlifovanie titanovykh splavov. kratkii literaturnyi obzor / D.G. Fedorov, D.V. Evdokimov, A.A. Plastinin // Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. – 2018. – Т. 20, № 1 (81). – S. 129-133.

10. Nosenko V.A. Vliianie sredy na pokazateli protsessa shlifovaniia stalei i titanovykh splavov instrumentom iz korunda i karbida kremniia / V.A. Nosenko, V.E. Puzyr'kova, N.D. Serdiukov, D.S. Sleptsov // Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvenno-go tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 8 (255). – S. 34-37.

11. Bratan S.M. Balans peremeshchenii v tekhnologicheskoi sisteme pri lentochnom rotatsionnom shlifovanii / S.M. Bratan, T.V. Stadnik, A.G. Kolesov // Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – Vyp. 8., ch. 1. – S. 270-275.

12. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process Bratan, S., Kolesov, A., Roshchupkin, S., Stadnik, T. MATEC Web of Conferences, 2017, 129, 01078

13. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys Bratan, S., Stadnik, T., Golovin, V. Materials Today: Proceedings, 2021, 38, pp. 2013–2018

14. Shiliaev S.A. Analiz konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov ustroistva rotatsionnogo lentochnogo okhvatyvaiushchego shlifovaniia na osnove issledovaniia dinamiki otnositel'nogo dvizheniia abrazivnoi lenty / S.A. Shiliaev S.A., A.G. Ivanov // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman. – 2011. – № 6. – S. 12–20.

15. Iakimov Ia.V. Optimizatsiia protsessa shlifovaniia – М: Mashinostroenie, 1975. – 176 s.

16. Shiliaev S.A. Issledovanie tekhnologicheskikh pokazatelei protsessa rotatsionnogo lentochnogo shlifovaniia i poluchenie matematicheskikh zavisimosti dlia kolichestvennogo analiza uslovii rezaniia/ S.A. Shiliaev// Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –2008. – № 2 (38). – S. 23-26.

•

УДК 004.94

## УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЯМИ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ

А.А. Тараховский<sup>1</sup>, А.Ю. Тараховский<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

### Аннотация

В данной работе рассматриваются узлы, включающие эластичную кольцевую деталь (ЭКД), установленную в канавку базовой детали (БД) – вала. Выявлены преимущества деформирования ЭКД с использованием БД. Управление деформациями ЭКД представлено как методологическая основа для проектирования автоматизированных методов и средств сборки.

**Ключевые слова:** деформация, эластичная кольцевая деталь, сборочные процессы

## CONTROL OF DEFORMATIONS OF ELASTIC RING PARTS IN AUTOMATED ASSEMBLY PROCESSES

А.А. Tarakhovskiy<sup>1</sup>, А.Ю. Tarakhovskiy<sup>1</sup><sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

In this paper, we consider nodes that include an elastic ring part (ERP) installed in the groove of the base part (BP) – shaft. The advantages of deformation of ERP using BP are revealed. ERP deformation management is presented as a methodological basis for the design of automated assembly methods and tools.

**Keywords:** deformation, elastic ring part, assembly processes

Узлы, включающие эластичную кольцевую (ЭКД) и жесткую базовую детали, широко используются в конструкциях машин и приборов всех отраслей современного производства. Узлы, в которых посадочным местом для ЭКД является наружная радиальная канавка, являются наиболее распространенными вследствие высокой технологичности и конструктивной простоты. Сопряжение собираемых деталей может быть достигнуто только при деформировании ЭКД. Изучение возможных деформаций и управление ими является важной научно-технической задачей [2-5]. В соответствии с закономерностями развития технических систем [1] узлы с ЭКД находятся на этапе интенсивного развития, сопровождаемого большим числом новых технических решений. Поэтому решения задач, где в качестве объекта рассматриваются узлы с ЭКД, рассчитаны на значительную временную перспективу.

Постоянное расширение номенклатуры изделий, выпускаемых промышленностью,

усложняет проектирование технологических процессов сборки таких узлов и повышает затраты на производство. Вместе с тем анализ эксплуатации различных конструкций показывает, что отказы в работе оборудования в большинстве случаев связаны с низким качеством монтажа ЭКД [6,7]. Причины выхода из строя узлов следующие:

- закусывание, скручивание ЭКД, ее расположение вне посадочного места;
- механические повреждения, порезы, надрывы ЭКД при сборке;
- чрезмерное растяжение ЭКД в процессе монтажа;
- выворачивание уплотняющей кромки ЭКД.

ЭКД необходимо обеспечить значительное изменение габаритных размеров и формы, при перемещении к канавке – предотвратить ее нежелательные деформации (скручивание, выворачивание уплотняющих кромок и т.д.), а для установки в канавку –

восстановить форму.

Структура технологического процесса сборки таких узлов включает три специфических этапа: деформирование ЭКД, подача ЭКД к канавке, восстановление формы ЭКД в канавке [8].

Все типы ЭКД – кольца, манжеты, втулки, вкладыши, оболочки, прокладки и мембраны – могут трансформироваться в любых комбинациях (рис. 1).

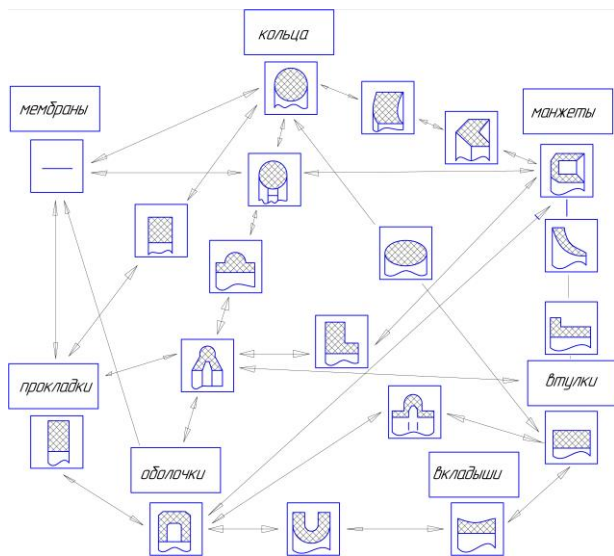


Рис. 1 - Конструктивные взаимосвязи различных типов ЭКД

В силу высокой технологичности, простоты и универсальности, а также того, что форма любой ЭКД может быть приведена к круговой, в качестве конкретной эластичной детали будем рассматривать кольцо круглого сечения.

Так как технологические воздействия на ЭКД определяются качественными и количественными характеристиками деформаций, важное значение приобретает исследование и расчет возможных деформаций ЭКД и управление ими на этапах сборочной операции. Это позволяет разрабатывать новые технологические процессы и оборудование на основе единого методологического подхода [2,10].

Основным видом деформации при установке ЭКД в наружные канавки является растяжение, которое может сопровождаться изгибом и кручением. Эластичной детали необходимо обеспечить такую деформацию, при которой ее форма описывает цилиндри-

ческую ограничивающую поверхность (ЦОП). ЦОП характеризуется диаметром  $D_{\text{ЦОП}}$  и величиной протяженности  $L_{\text{ЦОП}}$  и определяется характеристиками собираемых деталей.

Если базовая деталь (БД) диаметра  $D$  содержит одну канавку, расположенную на расстоянии  $l$  от торца, то  $D_{\text{ЦОП}} = D$ .

Если на поверхности БД имеется несколько канавок, или канавке предшествует резьбовой участок, проточка и т.д., необходимо предотвращать контакт ЭКД с этим участком во избежание повреждений. Для этого используются специальные оправки или такие деформации, при которых обеспечивается зазор между ЭКД и поверхностями БД. Эти факторы приводят к увеличению параметров ЦОП.

ЭКД должна описывать ЦОП таким образом, чтобы выполнялось условие ее прочности. Возможные варианты осуществления сборочной операции представлены рис.2, где изображена таблица, которая носит морфологический характер. Синтез выбранных вариантов при условиях совместимости и возможности физической реализации данной совокупности представляет собой основу метода или средства сборки узлов с ЭКД. Таблица позволяет типизировать технологию и прогнозировать разработку перспективных технологических маршрутов и гибкого сборочного оборудования.

Определяющее значение имеют характеристики специфических этапов сборки узлов с ЭКД. На их базе выделены четыре основных класса методов и средств сборки [9].

Класс 1 определяется тем, что деформирование и подача ЭКД осуществляются различными элементами. В соответствии с классом 2 один элемент выполняет функции деформирования и подачи. Случай деформирования ЭКД при помощи БД относится к классу 3. Класс 4 включает способы и устройства сборки при отсутствии деформирующего органа. Деформирующий эффект достигается специальными воздействиями на ЭКД (например, использованием центробежных сил). В рамках каждого класса воз-

можны различные варианты восстановления формы ЭКД.

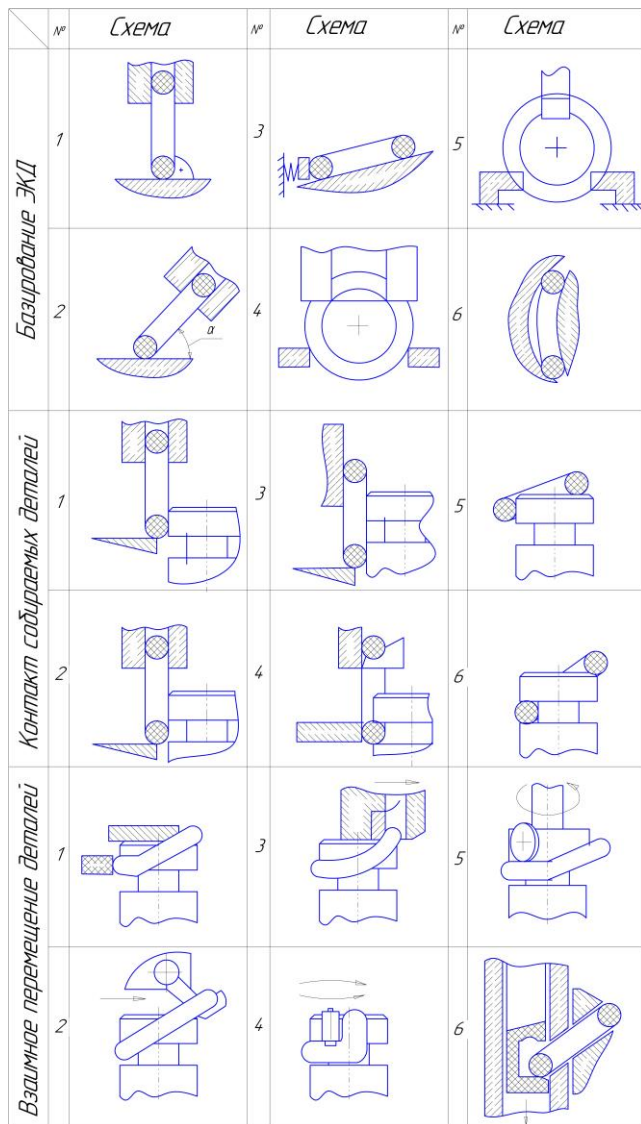


Рис. 2 - Варианты реализации этапов сборочной операции

Наименее исследованным является класс 3. Вместе с тем изучение процессов сборки на основе использования БД в качестве органа деформирования позволяет обеспечить рациональное деформирование и высокую эффективность сборочной операции. Сокращается время цикла сборки. Существенно упрощается конструкция исполнительного сборочного механизма, традиционно содержащего деформирующий орган.

Варианты деформирования ЭКД на рассматриваемых этапах сводятся к схемам, представленным в таблице, изображенной на рис. 3. Показаны характер прилагаемой к

ЭКД нагрузки, точки перегибов упругой линии кольца, протяженность  $L_{\text{цоп}}$  для различных случаев и последовательность описывания кольцом  $D_{\text{цоп}}$ . Эти данные являются основой для моделирования поведения ЭКД и управления деформациями в процессе реализации сборочной операции.

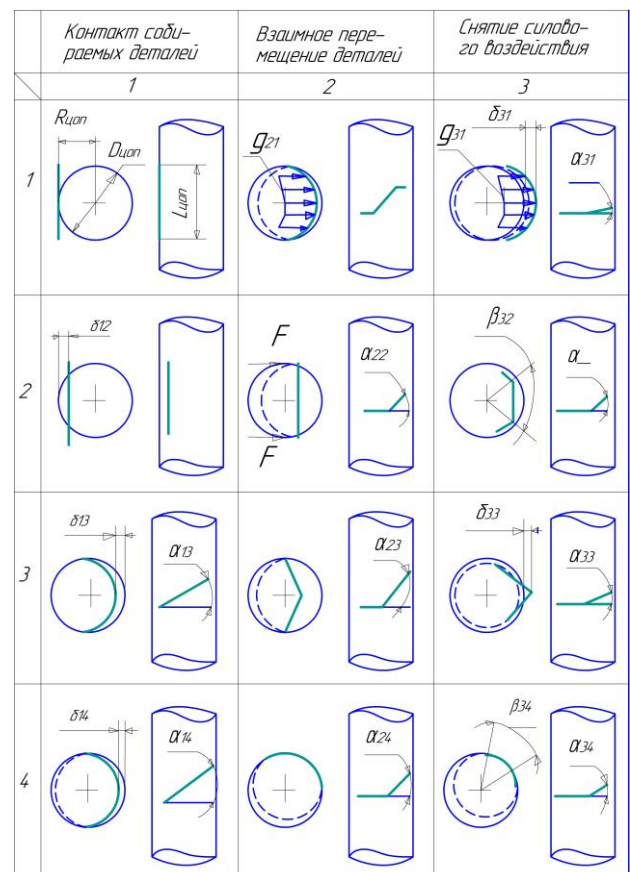


Рис. 3 - Варианты деформирования ЭКД на этапах сборочной операции

Применимость рассматриваемого варианта деформирования ЭКД ограничена типажом базовых деталей. Надежная сборка обеспечивается при выполнении условия

$$l \leq k \cdot D, \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние от торца базовой детали до канавки;

$k$  – коэффициент, учитывающий геометрические характеристики ЭКД и физико-механические свойства ее материала (резины);

$D$  – диаметр уплотняемой поверхности.

Однако реализация сборочного процесса в соответствии с вариантом 4 (рис. 3) позволяет устанавливать ЭКД в канавки базовых деталей и в случаях это обеспечивается перемещением точки приложения усилия на кольцо по винтовой линии. Плоскость кольца располагается к диаметральной плоскости ЦОП под углом  $\alpha$  (рис. 3, схема 1.4); кольцо принимает эллиптическую форму. При заданном диаметре уплотняемой поверхности длина  $S$  эллипса в любой момент определяется величиной протяженности  $L_{\text{ЦОП}}$ :

$$S = C1BE(k \cdot \frac{\pi}{2}), \quad (2)$$

где  $C1B = (D_{\text{ЦОП}}^2 + L_{\text{ЦОП}}^2)^{1/2} + d_2$ , - большая ось эллипса,

$d_2$  - диаметр сечения кольца;

$E(k \cdot \frac{\pi}{2})$  - эллиптический интеграл второго рода;

$k$  - параметр.

Ограничением в этом случае является требование отсутствия на поверхности, предшествующей канавке, проточек, резьбы и других элементов, повреждающих кольцо, так как именно при контакте с этой поверхностью обеспечивается деформирование кольца.

Максимальная деформация (длина растянутого кольца) наблюдается в момент, когда последний участок кольца переходит с торца базовой детали на ее уплотняемую поверхность и располагается на фаске при условии, что другой участок уже располагается в канавке (рис. 4).

Форму кольца и в этом случае можно считать эллиптической, но необходимо, чтобы выполнялось условие прочности. Критическое значение угла наклона плоскости кольца к диаметральной плоскости ЦОП находится по формуле:

$$\sin \alpha_p = (l + d_2) / (d_2 + (l_p + d_2)^2)^{1/2} + d_2, \quad (3)$$

где  $l_p$  - параметр, при котором наступает разрыв кольца (табличное значение).

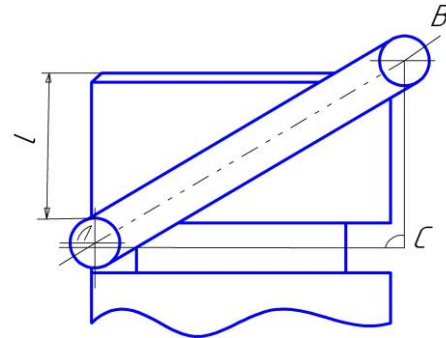


Рис. 4 - Схема максимальной деформации эластичного кольца

При описании упругой линии кольца ее можно представить состоящей из участков, расположенных под углом  $\alpha_{ij}$  относительно друг друга:

-участок, расположенный в канавке /или на уплотняемой поверхности/ базовой детали;

-участок, контактирующий с уплотняемой и торцевой поверхностями базовой детали.

В зависимости от  $\alpha_{ij}$  длину упругой линии кольца можно рассчитывать по формуле либо находить как сумму длин названных участков.

Результаты проведенных исследований позволяют управлять деформированием ЭКД, обеспечивать рациональные деформации на этапах сборочной операции и разрабатывать на этой основе высокоэффективные методы и средства сборки.

### Список литературы

1. Воронин А.В. Механизация и автоматизация сборки в машиностроении /А.В. Воронин, А.И. Гречухин, А.С. Калашников и др. - М.:Машиностроение, 1985. - 272 с.
2. Харченко, А. О. Особенности создания технологии механизированной и автоматизированной сборки уплотнительных соединений / А. О. Харченко, А. А. Тараховский, А. Ю. Тараховский // Современные проблемы теории машин. – 2021. – № 11. – С. 46-49. – DOI 10.26160/2307-342X-2021-11-46-49.
3. Тараховский, А. Ю. Классификация способов и устройств для автоматической сборки уплотнительных соединений в условиях гибкого автоматизированного производства / А. Ю. Тараховский, И. И. Бабилов, А. А. Тараховский // Механики XXI века. – 2018. – № 17. – С. 188-192.

4. Столярук, Д. В. Повышение уровня автоматизации процесса сборки уплотнительных узлов "уплотнительное кольцо - внутренняя канавка базовой детали" / Д. В. Столярук, А. А. Тараховский, А. Ю. Тараховский // Наука и инновации XXI века : Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых, Сургут, 30 ноября 2017 года. – Сургут: Сургутский государственный университет, 2017. – С. 102-106.

5. Тараховский, А. Ю. Анализ основных видов уплотнений для силовых гидроцилиндров / А. Ю. Тараховский, А. А. Тараховский // Вестник современных технологий. – 2019. – № 2(14). – С. 37-43.

6. Тараховский, А. А. Обоснование автоматизации сборки радиальных уплотнительных соединений с наружными канавками / А. А. Тараховский, А. Ю. Тараховский // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 19–22 мая 2020 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. – С. 117-122.

7. Тараховский, А. А. Типизация базовых деталей уплотнительных соединений (эластичная кольцевая деталь - канавка отверстия) / А. А. Тараховский, А. Ю. Тараховский // Механика XXI века. – 2017. – № 16. – С. 189-194.

8. Буренин В.В. Новые конструкции уплотнений для подвижных соединений силовых гидроцилиндров объёмного гидропривода строительных машин и механизмов / Механизация строительства. 2012. № 1. С. 10-14.

9. Голубев А.И., Кондаков Л.А., ред. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение, 1994, 448 с.

10. Шерешевский А.Н., Тараховский А.Ю. Системный подход к анализу сборки узлов с эластичными кольцевыми деталями /Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. /Редкол.: В.Я.Копп (отв. ред.) и др.; Севастоп. гос. техн. ун-т. - Севастополь, 1999 г. - С.145-149.

## References

1. Voronin A.V. Mehanizatsiya i avtomatizatsiya sborki v mashinostroyenii /A.V. Voronin, A.I. Grechuhin,

A.S. Kalashnikov i dr. - M.:Mashinostroyenie, 1985. – 272 s.

2. Kharchenko, A. O. Osobennosti sozdaniya tehnologii mehanizirovannoy i avtomatizirovannoy sborki uplotnitelnykh soedineniy / A. O. Kharchenko, A. A. Tarakhovskiy, A. Yu. Tarakhovskiy // Sovremennyye problemy teorii mashin. – 2021. – # 11. – S. 46-49. – DOI 10.26160/2307-342X-2021-11-46-49.

3. Tarakhovskiy, A. Yu. Klassifikatsiya sposobov i ustroystv dlya avtomaticheskoy sborki uplotnitelnykh soedineniy v usloviyakh gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva / A. Yu. Tarakhovskiy, I. I. Babikov, A. A. Tarakhovskiy // Mehaniki XXI veku. – 2018. – №17. – S. 188-192.

4. Stolyaruk, D. V. Povyishenie urovnya avtomatizatsii protsessov sborki uplotnitelnykh uzlov "uplotnitelnoe koltso - vnutrennyaya kanavka bazovoy detali" / D. V. Stolyaruk, A. A. Tarakhovskiy, A. Yu. Tarakhovskiy // Nauka i innovatsii XXI veka : Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, Surgut, 30 noyabrya 2017 goda. – Surgut: Surgutskiy gosudarstvennyy universitet, 2017. – S. 102-106.

5. Tarakhovskiy, A. Yu. Analiz osnovnykh vidov uplotneniy dlya silovykh gidrotsilindrov / A. Yu. Tarakhovskiy, A. A. Tarakhovskiy // Vestnik sovremennykh tehnologiy. – 2019. – # 2(14). – S. 37-43.

6. Tarakhovskiy, A. A. Obosnovanie avtomatizatsii sborki radialnykh uplotnitelnykh soedineniy s naruzhnymi kanavkami / A. A. Tarakhovskiy, A. Yu. Tarakhovskiy // Sovremennyye tehnologii: problemy i perspektivy : sbornik statey vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii dlya aspirantov, studentov i molodykh uchY-onykh, Sevastopol, 19–22 maya 2020 goda. – Sevastopol: Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sevastopolskiy gosudarstvennyy universitet", 2020. – S. 117-122.

7. Tarakhovskiy, A. A. Tipizatsiya bazovykh detaley uplotnitelnykh soedineniy (elastichnaya koltsevaya detal - kanavka otverstiya) / A. A. Tarakhovskiy, A. Yu. Tarakhovskiy // Mehaniki XXI veku. – 2017. – # 16. – S. 189-194.

8. Burenin V.V. Novyye konstruksii uplotneniy dlya podvizhnykh soedineniy silovykh gidrotsilindrov ob'Yomnogo gidroprivoda stroitelnykh mashin i mehanizmov / Mehanizatsiya stroitelstva. 2012. # 1. S. 10-14.

9. Golubev A.I., Kondakov L.A., red. Uplotneniya i uplotnitelnaya tehnika. Spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. Moskva, Mashinostroyenie, 1994, 448 s.

10. Shereshevskiy A.N., Tarakhovskiy A.Yu. Sistemyy podhod k analizu sborki uzlov s elastichnyimi koltsevyimi detalyami /Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov: Sb. nauch. tr. /Redkol.: V.Ya.Kopp (otv. red.) i dr.; Sevastop. gos. tehn. un-t. - Sevastopol, 1999 g. - S.145-149.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАРЕЗАНИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ (M2 – M6)

П.А. Новиков<sup>1</sup>, П. К. Сопин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

### Аннотация

В статье представлена математическая модель нарезания внутренней резьбы малого диаметра (M2-M6). Математическая модель описана с помощью системы неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами. Природа изменения коэффициентов связана с особенностью процесса обработки внутренних резьб. При врезании метчика в отверстие происходит перераспределение плоскости закрепления для рассматриваемого зуба и следующего за ним. При этом утверждения крутильная жесткость от плоскости закрепления до рассматриваемого зуба меняется – от меньшего к большему. Подобный же подход применен и для определения и описания поведения момента инерции. Приведен результат практического моделирования изучаемого процесса.

**Ключевые слова:** внутренняя резьба, малый диаметр, процесс обработки, математическая модель

## MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF CUTTING INTERNAL THREADS OF SMALL DIAMETERS (M2 - M6)

P.A. Novikov<sup>1</sup>, P.K. Sopin

<sup>1</sup> Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

### Abstract

The article presents a mathematical model for cutting an internal thread of small diameter (M2-M6). The mathematical model is described using a system of inhomogeneous differential equations of the second order with variable coefficients. The nature of the change in the coefficients is associated with the peculiarity of the process of processing internal threads. When the tap is cut into the hole, the plane of fastening is redistributed for the tooth in question and the next one. With this statement, the torsional rigidity from the plane of fastening to the considered tooth changes - from smaller to larger. A similar approach has been used to define and describe the behavior of the moment of inertia. The result of practical modeling of the studied process is given.

**Keywords:** internal thread, small diameter, machining process, mathematical model

Для внутренней резьбы как конструктивного элемента деталей машин основными критериями качества являются допуски на диаметры — внутренний, внешний и средний, на шаг резьбы и шероховатость рабочих поверхностей. Если же рассматривать технологический процесс формирования внутренних резьб малых диаметров M2–M6 режущими метчиками, основными критериями качества его реализации можно назвать отклонения геометрии мерного инструмента от требуемой и отклонения траектории движения инструмента от идеальной винтовой линии [1]. Отклонения в геометрии инструмента могут быть обусловлены погрешно-

стями изготовления, износа, температурного расширения, упругих и пластических деформаций. Траектория движения инструмента может быть нарушена по причине ошибок в кинематике станка, не прямолинейности оси обрабатываемого отверстия, отсутствия соосности инструмента и обрабатываемого отверстия, неперпендикулярности торцевой плоскости отверстия к оси инструмента и множеством других.

Процесс нарезания резьб малых диаметров характеризуется совокупностью сложных механических, физических и химических процессов и явлений, обусловленными пластическими, упругими и: температурными деформациями, химическим взаимодей-

ствием обрабатываемого материала, инструмента и компонентов СОТС.

Первый, основополагающий труд, посвященный попытке понимания и описания природы процесса внутреннего резьбонарезания был осуществлен Матвеевым В.В. [1].

$$\Delta l_1 = 0,0023 \frac{50 - L_\Sigma}{50 + L_\Sigma} \left( \sin \left( \frac{\pi}{3} - \gamma_{o.c.} \right) \left( \sum_{i=i_z z+1}^{i_z z+m} F_{y\vartheta}(i) - 0,2m \right) + 2 \sin \left( \frac{\pi}{3} - \gamma_{o.c.} \right) \left( \sum_{i=i_z z+m}^{k+m} F_{y\vartheta}(i) - 0,2(k - i_z z) \right) \right) \quad (1)$$

где  $L_\Sigma$  – суммарная длина прохода режущей кромки по обрабатываемому материалу;  $\gamma_{o.c.}$  – угол между вектором действия неуравновешенной осевой силы и осью метчика;  $i_z$  – номер рассматриваемого витка;  $z$  – число перьев метчика;  $m$  – число зубьев заборного конуса;  $i$  – номер зуба метчика;  $F_{y\vartheta}$  – сила, приходящаяся на 1 мм длины режущей кромки;  $k$  – число калибрующих зубьев, прошедших через рассматриваемый  $i_z$  виток.

Однако зависимость (1) справедлива для инструмента среднего и крупного типоразмера, характеризующегося высокой крутильной жесткостью.

Попытка определения основного фактора, влияющего на точность внутренней резьбы малого диаметра при обработке легированных сталей была осуществлена в исследованиях Ф.Н. Канарева. В работе [2] было показано, что при работе метчиков с относительно невысокой крутильной жесткостью (0,1 Нм/град), угол скручивания составляет от  $20^\circ$  до  $50^\circ$ . За счет этого происходит переориентация зубьев инструмента и траектория движения каждого из зубьев заборной и калибрующей части метчика отличается от теоретической, что приводит к подрезанию боковой стороны резьбы и «разбиванию» среднего диаметра.

Зависимость величины «разбивания» имеет вид:

Автор полагал что за счет неуравновешенной осевой составляющей сил резания возникает погрешность перемещения по шагу. Для ее описания предложена следующая зависимость:

$$X_i^z = \frac{P}{2\pi} \frac{\sum_{i=1}^{i-1} (M_{кр.i} l_i)}{G J_\rho}, \quad (2)$$

где  $X_i^z$  – величина смещения  $i$ -го зуба метчика при участии в обработке  $z$  числа зубьев;  $P$  – шаг резьбы;  $M_{кр.i}$  – момент сил резания на  $i$ -м зубе метчика;  $l_i$  – расстояние от плоскости закрепления до  $i$ -го зуба рабочей части;  $G$  – модуль Юнга при кручении;  $J_\rho$  – приведенный полярный момент инерции метчика.

Зависимость (2) более точно отражает характер формирования погрешностей при обработке резьб малого диаметра, но и она не лишена недостатков, основным из которых является отсутствие учета динамики в процессе обработки.

Целью статьи является разработка математической модели процесса силового динамического взаимодействия элементов системы резьбонарезания, учитывающая физико-механические характеристики инструмента и их изменение в процессе обработки.

В качестве теоретической основы, рассмотрим инструмент как объект упруго-пластической теории. При этом, метчик справедливо рассматривать как «модель Кельвина-Фойгта» [3], обладающий параллельно взаимодействующими диссипативным и упругим элементами (рис. 1). Необходимо отметить, что в последующих рассуждениях, кроме

указанных ранее, будет присутствовать инерционный элемент, определяемый моментом инерции метчика.

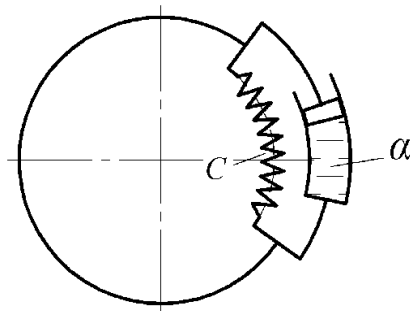


Рис. 1 - Представление метчика в процессе обработке как «модель Кельвина-Фойгта»

Для более принятого в технологии машиностроении вида, представим физическую модель как векторы моментов сил, действующих в процессе нарезания резьб (рис. 2).

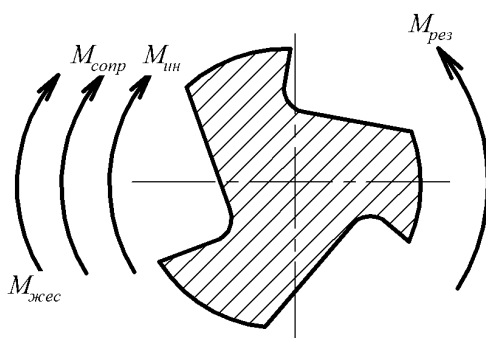


Рис. 2 - Сечение метчика с действующими моментами сил

На инструмент, обладающий моментом инерции, действует момент сил инерции, момент сил сопротивления движению, возникающий за счет внутренних сил трения в инструменте и материале обрабатываемого отверстия, и момент сил сопротивления скручиванию, обусловленный наличием крутильной упругости (жесткости) инструмента.

С другой стороны, в процессе резания на метчик действует момент резания, который и определяет процесс резбонарезания. Моменты сил инерции, реакций и резания представляются с помощью закона Ньютона следующим единым уравнением равновесия:

$$M_{ин} = M_{рез} - M_{сопр} - M_{жес} \quad (3)$$

Уравнение (3) выразим через физические параметры: момент сил инерции  $M_{ин} = J \cdot \varepsilon$ , где  $J$  - момент инерции метчика от данного зуба до плоскости закрепления; - угловое ускорение данного зуба метчика; момент сопротивления движению  $M_{сопр} = \alpha \cdot \omega$ , здесь  $\alpha$  - коэффициент сопротивления движению (декремент затухания);  $\omega$  - угловая скорость зуба метчика; момент сил упругости (жесткости)  $M_{жес} = c \cdot \varphi$ , где  $c$  - коэффициент жесткости метчика от рассматриваемого зуба до плоскости закрепления;  $\varphi$  - угол скручивания метчика на рассматриваемом зубе. Таким образом, уравнение (1) примет вид

$$J \cdot \varepsilon = M_{рез} - \alpha \cdot \omega - c \cdot \varphi \quad (4)$$

Выразим через угол скручивания  $\varphi$  угловое ускорение  $\varepsilon$  и угловую скорость  $\omega$ . При этом  $\varepsilon$  - есть вторая производная  $\varphi$  по времени -  $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ ;  $\omega$  - первая производная  $\varphi$  по времени  $\frac{d\varphi}{dt}$  — и уравнение (4) после преобразование имеет вид

$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \alpha \cdot \frac{d\varphi}{dt} + c \cdot \varphi = M_{рез}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с недетерминированными коэффициентами.

Для пояснения того, почему утверждается что коэффициенты уравнения (5) являются недетерминированными, рассмотрим рис. 3. На рис. 3 показан метчик в момент врезания зуба  $N$  заборного участка. При этом метчик обладает некоторой жесткостью  $c1$ , определенной расстоянием  $l1$  от плоскости закрепления до зуба  $N$ .

Но через заданное время, в силу особенности реализации процесса

резьбонарезания, метчик перемещается по винтовой траектории и вступает в резание зуб  $N+1$ . В то же самое время плоскость закрепления для зуба  $N$  начинает смещаться, приближаясь к зубу, и скорость этого смещения равна скорости врезания зуба  $N+1$ . После полного врезания зуба  $N+1$  плоскость закрепления для зуба  $N$  характеризуется расстоянием  $l2$ , равным  $P/3$ , где  $P$  – шаг резьбы, а крутильная жесткость величиной  $c2$ . Функционально данный процесс выразится следующей системой уравнений:

$$C = \begin{cases} c1, & t \geq t_N, \\ f(c) & t_{N+1} \leq t < t_{N+1} + t_{\varphi_{N+1}}, \\ c2 & t \geq t_{N+1} + t_{\varphi_{N+1}}. \end{cases} \quad (6)$$

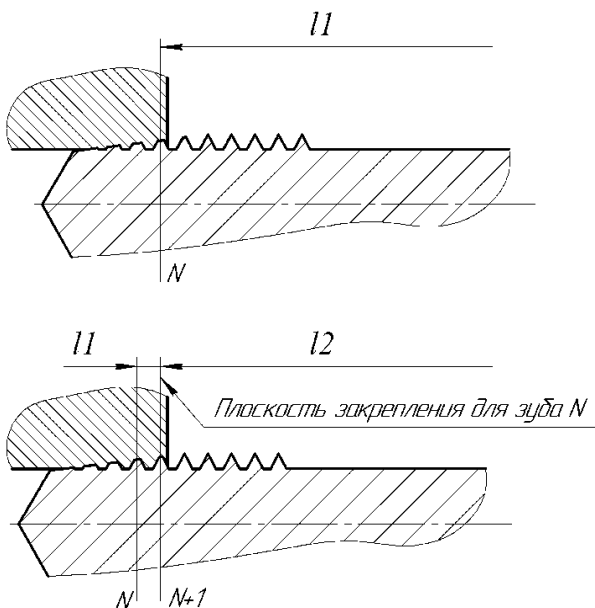


Рис. 3 - Изменение коэффициента жесткости

Таким образом, благодаря изменению физических условий, коэффициент дифференциального уравнения  $C$  – крутильная жесткость – изменяется во времени. При этом изменяется не только коэффициент жесткости  $C$ , но и момент инерции  $J$ , выражающийся подобной системой

$$J = \begin{cases} J1, & t \geq t_N, \\ f(J), & t_{N+1} \leq t < t_{N+1} + t_{\varphi_{N+1}}, \\ J2, & t \geq t_{N+1} + t_{\varphi_{N+1}}. \end{cases} \quad (7)$$

Но декремент затухания  $\alpha$  остается постоянным, т.к. физические условия для этого коэффициента неизменны. Рассмотрим правую часть неоднородного дифференциального уравнения. Согласно [2] момент резания можно раскрыть как

$$M_{кр} = M_p + M_{mp.n.} + M_{mp.c.} + M_{mp.1} + M_{mp.2} + M_{mp.3}, \quad (8)$$

где  $M_p$  – крутящий момент, расходуемый на “чистое” резание;  $M_{mp.n.}$  – крутящий момент трения, возникающий за счет воздействия осевых и радиальной нагрузок на кромке зуба;  $M_{mp.c.}$  – крутящий момент трения стружки о канавки метчика;  $M_{mp.1}$ ,  $M_{mp.2}$ ,  $M_{mp.3}$  – крутящие моменты трения зубьев метчика о витки резьбы соответственно за счет скручивания тела метчика и деформации его сечений, за счет разности радиальных составляющих от сил резания, за счет растяжения и сжатия шагов метчика от действия изгибающего момента, приложенного к хвостовику.

Кроме того, за счет скручивания метчика при входе каждого следующего зуба в обрабатываемое отверстие появляется и возрастает дополнительный момент сил резания  $\Delta M(t)$ . Суммарный момент сил трения по мере износа зубьев возрастает, и если его обозначить через  $M_{mp}(t)$ , формула для  $M_{рез}$  будет следующей:

$$M_{рез} = M_p + \Delta M(t) + M_{mp}(t) \quad (9)$$

Но т.к. в процессе резания участвует не один зуб, а все рабочие и часть калибрующих зубьев метчика, то для  $N$ -го зуба формула (9) примет вид

JOURNAL OF MODERN TECHNOLOGIES, 2021, № 3(23)

Система уравнений (13) дает возможность определить:

- 1) в любой момент времени нагрузку на любом из зубьев, участвующих в резании;
- 2) угол, на который закручен интересующий зуб метчика;
- 3) время, реализации процесса резания в целом и отдельных его элементов.

В результате была разработана и реализована программа в математическом пакете Maple, моделирующая процесс резбонарезания. График изменения угла скручивания метчика от времени, представлен на рис. 5.

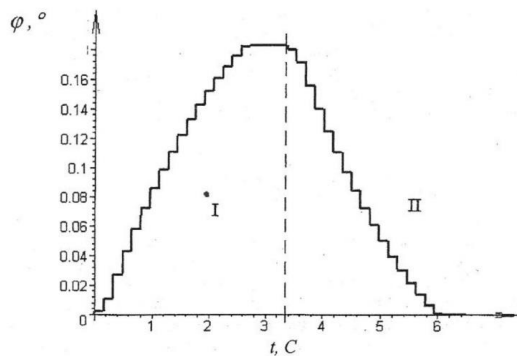


Рис. 5 - Угол скручивания метчика от времени:  
I - участок врезания и нарезания резьбы в отверстии;  
II - участок выхода заборного конуса из обрабатываемого отверстия

## Список литературы

1. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб/ В.В. Матвеев. — М.: Машиностроение, 1978. — 88 с.
2. Канареев Ф.Н. Влияние деформаций кручения рабочей части метчиков на точность внутренних резьб малых диаметров (M2...M6)/ Ф.Н. Канареев // Вестник СевНТУ. Сер. машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 107. — С. 81 — 88.
3. Биргер И. А. Сопротивление материалов: Учебное пособие/ И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. — М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.— 560 с.

## References

1. Matveev V.V. Narezanie tochnykh rez'b/ V.V. Matveev. — M.: Mashinostroenie, 1978. — 88 s.
2. Kanareev F.N. Vliianie deformatsii krucheniia rabochei chasti metchikov na tochnost' vnutrennikh rez'b mal'nykh diametrov (M2...M6)/ F.N. Kanareev // Vestnik SevNTU. Ser. mashinopriboroostroyeniye i transport: sb. nauch. tr. — Sevastopol', 2010. — Vyp. 107. — S. 81 — 88.
3. Birger I. A. Soprotivleniye materia-lov: Uchebnoye posobie/ I.A. Birger, R.R. Mavliutov. — M.: Nauka. gl. red. fiz.-mat. lit., 1986.— 560 s.

УДК 621.9

## ПРОИЗВОДЯЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ГИПЕРБОЛОИДНОГО ЗУБООБКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА

В.А. Витренко<sup>1</sup>, А.А. Ефимов<sup>1</sup>, А.Д. Михайлова<sup>1</sup><sup>1</sup> Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганская Народная Республика

### Аннотация

Повышение производительности и качества выпускаемой продукции – это одна из основных задач которая стоит перед технологами и инструментальщиками, занимающимися изготовлением зубчатых колес. Изготовление зубчатых колес при помощи многозаходных зубообрабатывающих инструментов не нашло широкого внедрения в промышленности. Это объясняется несовпадением исходной инструментальной поверхности с производящей. В данном исследовании зубообрабатывающий инструмент представляет собой гиперboloидный инструмент, полученный как огибающая обрабатываемого зубчатого колеса. Геометрия предложенного инструмента позволяет не затыловать такой инструмент. Следовательно, получаем совпадение производящей поверхности с исходной инструментальной. Кроме того, геометрия разработанного инструмента позволяет затачивать переднюю поверхность такого инструмента под любым углом. Такое положение дает возможность обрабатывать любые материалы при оптимальных режимах резания.

**Ключевые слова:** зубообработка, производящая поверхность, затыловка, инструментальная поверхность, передний угол, задний угол

## PRODUCING SURFACE OF HYPERBOLA TEETH-ROLLING INSTRUMENT

V.A. Vitrenko<sup>1</sup>, A.A. Efimov<sup>1</sup>, A.D. Miknailova<sup>1</sup><sup>1</sup> Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk People's Republic

### Abstract

Increase of manufactured products productivity and quality is one of the major tasks facing production engineers and tool-making specialists engaged in gear-wheels production. Gear-wheels production using multi-pass teeth-treating instruments has not found a wide application in industry yet. It is explained by mismatching of basic instrument surface with a producing one. In the given investigation teeth-treating instrument presents a hyperbola instrument obtained as an enveloping of a gear-wheel being treated. Geometry of proposed instrument makes it possible not to relieve such an instrument. Consequently, producing surface matches the basic instrument one. Furthermore, geometry of developed instrument allows to grind the front surface of such an instrument at any angle. This approach allows to treat any materials at optimal cutting conditions.

**Keywords:** teeth-treatment, producing surface, relieving, instrument surface, front angle, back angle

Нарезание цилиндрических прямозубых и косозубых зубчатых колес методом обкатки нашло широкое применение во всех отраслях промышленности. С целью повышения производительности такого зубонарезания исследователи пытаются разработать новые конструкции зуборезного инструмента. Одним из таких направлений является разработка различных многозаходных инструментов, применяемых для нарезания и чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес. Однако в промышленности внедрение такого инструмента не нашло широкого применения из-за сложно-

сти его изготовления обусловленной сложностью процесса затыловки его задней поверхности. С увеличением числа заходов инструмента процесс затыловки резко усложняется, а иногда становится невозможным. Затыловка инструмента, очень часто, достигает 70% стоимости его изготовления. Такое положение привело к тому, что процесс проектирования, изготовления и апробирования многозаходных зуборезных инструментов является малоизученным.

При нарезании зубчатых колес при помощи многозаходных зубообрабатывающих

инструментов относительное движение инструмента и нарезаемой заготовки определяется двумя независимыми параметрами. В соответствии с этим, поверхность зубьев многозаходного инструмента является огибающей двухпараметрического семейства поверхностей нарезаемого цилиндрического зубчатого колеса. Относительное движение с двумя независимыми параметрами осуществляется при нарезании зубьев инструментами, когда, помимо движения обкатки, существует еще и движение подачи инструмента [1-6]. Необходимо отметить, что не все зубообрабатывающие станки могут нарезать зубья при помощи многозаходного инструмента. Это обусловлено прежде всего тем, что невозможно настроить гитару деления зубофрезерного станка. Кроме того, не все зубофрезерные станки оснащены протяжным суппортом, наличие которого обязательно для нарезки сложных многозаходных зубчатых колес и инструментов.

Зуборезный инструмент и нарезаемое зубчатое колесо вращаются на оправках зубофрезерного станка вокруг скрещивающихся осей, при этом углы их поворота связаны соотношением:  $\psi_{12} = d\varphi_1 / d\varphi_2$ . Кроме того, зуборезный инструмент вместе с инструментальной оправкой перемещается при помощи движения подачи вдоль оси нарезаемого зубчатого колеса  $z_1$ . Ось нарезаемого зубчатого колеса скрещена по отношению к оси инструмента  $z_2$  под углом скрещивания  $\gamma$ . Чем больше заходов имеет зуборезный инструмент, тем больше угол подъема его витка, а, следовательно, и угол скрещивания осей инструмента и нарезаемой заготовки. Текущая величина перемещения зуборезного инструмента относительно нарезаемого цилиндрического зубчатого колеса обозначается через  $\mu = z_1$  (рис. 1). Значения переменных величин  $\mu$  и  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2$ ) между собой не связаны, и поэтому они являются двумя независимыми параметрами.

Представленная схема изготовления цилиндрических зубчатых колес будет иметь место при нарезании зубьев колес

при помощи гиперболоидных фрез, обкаточных резцов, шеверов и других зубообрабатывающих инструментов. Перемещение  $\mu$  обкатного инструмента представляет его подачу. Кроме того, при помощи такого инструмента можно нарезать зубчатые колеса небольшой ширины. При этом можно производить зубонарезание при помощи радиальной подачи.

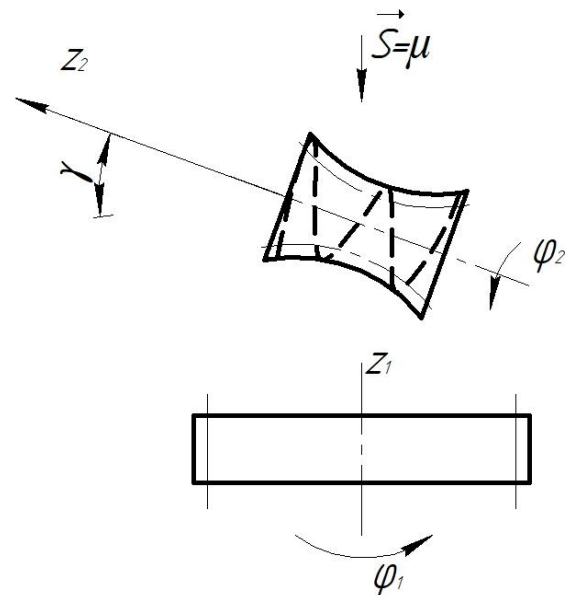


Рис. 1. Нарезание цилиндрического зубчатого колеса при помощи гиперболоидного инструмента

Необходимо отметить, что все перечисленные выше обкатные инструменты в промышленности должны изготавливаться по такой же схеме формообразования [7,8]. Такое положение позволяет получить на обкатном зубообрабатывающем инструменте производящую поверхность, совпадающую с исходной инструментальной поверхностью, которая получается при помощи обкатного резца определенной геометрии. В этом случае обкатной многозаходный инструмент целесообразно применять для нарезания зубчатых колес с идентичными параметрами (число зубьев, модуль), как инструмент при помощи которого был спрофилирован многозаходный зуборезный инструмент.

С целью получения многозаходного гиперболоидного инструмента, позволяющего нарезать зубчатые колеса любой геометрии (число зубьев), необходимо разработать

новую схему формообразования такого инструмента в пространственном станочном зацеплении. В этом случае, нарезание зубьев на гиперboloидном инструменте будем осуществлять при помощи обкаточного резца, представляющего собой цилиндрическое прямозубое или косозубое зубчатое колесо, выполненное из инструментальной стали рис.2. Оси нарезаемой гиперboloидной заготовки и обкаточного резца скрещиваются под углом  $\gamma$ . Углы поворота нарезаемой заготовки и инструмента, как и ранее, связаны соотношением  $\psi_{12} = d\phi_1 / d\phi_2$ . Торцовое сечение обкаточного резца движется вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперboloида. Такое относительное перемещение элементов зацепления будет аналогично зацеплению зуборезной рейки (зубчатого колеса бесконечно большого диаметра) с нарезаемым гиперboloидным зубчатым колесом. В результате таких относительных движений получим гиперboloидную основную инструментальную поверхность принципиально новой геометрии.

После прорезки стружечных канавок и их чистовой обработки получается многозаходный гиперboloидный зуборезный инструмент. Основное преимущество такого инструмента – возможность зацепляться с цилиндрическими зубчатыми колесами любой геометрии (количество зубьев), а следовательно, нарезать цилиндрические зубчатые колеса с любым числом зубьев. Кроме того, такой зуборезный инструмент имеет геометрические и кинематические задние углы, что не требует дальнейшей дорогостоящей операции его затыловки [9,11]. Такое положение позволяет затачивать переднюю грань этого инструмента под любым углом в зависимости от материала нарезаемых цилиндрических зубчатых колес. Очень важным является то, что в этом случае исходная инструментальная поверхность инструмента совпадает с его производящей поверхностью. Это свидетельствует о том, что разработанный инструмент более точный, по сравнению с существующим инструментом. Однако, для изготовления такого инструмента необходимо спроектиро-

вать сложнейшие приспособления к зубофрезерным станкам или иметь зубофрезерный станок, оснащенный протяжным суппортом. Для нарезания колес на таком станке необходима специальная сложная настройка такого станка.

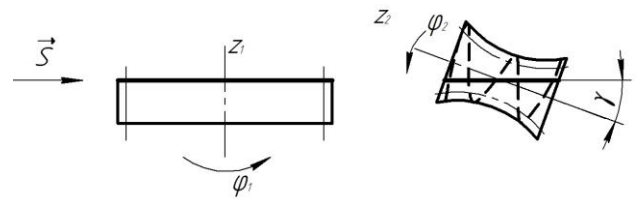


Рис. 2. Схема нарезания зубьев гиперboloидного инструмента

Для определения профиля производящей поверхности запишем подвижные системы координат  $S_1$  и  $S_2$ , связанные с обкаточным резцом (прямозубый или косозубый долбяк) и гиперboloидной заготовкой, неподвижную систему координат  $S$ , а также вспомогательные системы координат  $S$  и  $S_p$ , необходимые нам для преобразования движений (рис. 3).

Системы координат  $S$  и  $S_p$  смещены по оси вращения зубчатого колеса  $z_1$  на величину  $\mu$ . Точку на искомой поверхности проектируемого инструмента найдем при помощи матриц перехода от известной, в математическом виде, поверхности обкаточного резца (прямозубого или косозубого долбяка) к поверхности искомого гиперboloидного многозаходного зуборезного инструмента.

Далее найдем единичный вектор нормали  $\vec{n}_1$  к боковой поверхности зубьев, которая задана в параметрической форме. Радиус-вектор текущей точки поверхности зубьев обкаточного резца, проведенный из начала координат, определяется следующим уравнением:

$$\vec{r} = x(\lambda, \mu)\vec{i} + y(\lambda, \mu)\vec{j} + z(\lambda, \mu)\vec{k}, \quad (1)$$

где:  $\lambda$  и  $\mu$  – независимые параметры уравнения поверхности.

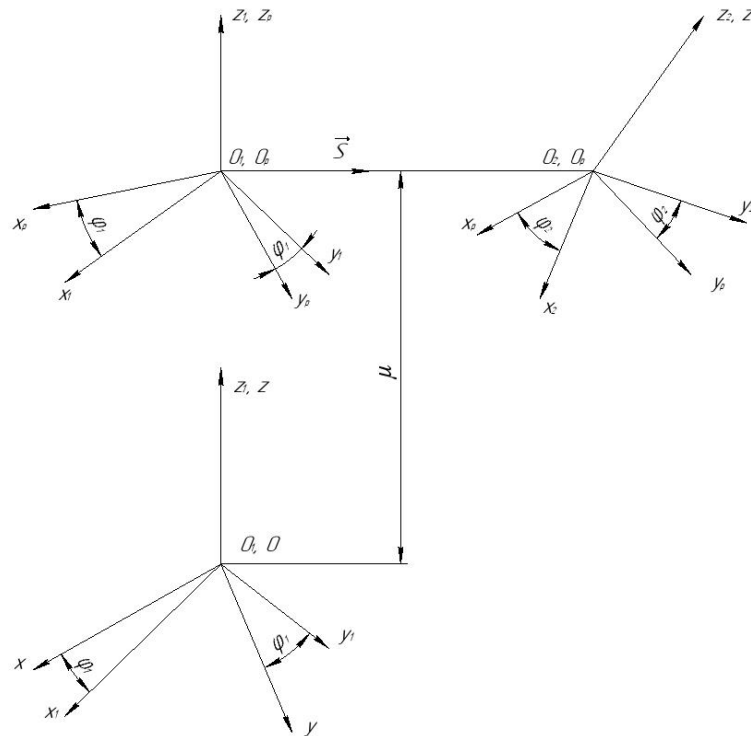


Рис. 3. Системы координат

Для выполнения условий основного уравнения зацеплений, а также для независимости параметров  $\lambda$  и  $\mu$  необходимо, чтобы:

$$\partial \vec{r} / \partial \lambda \times \partial \vec{r} / \partial \mu \neq 0 \quad (2)$$

Параметры  $\lambda$  и  $\mu$  являются независимыми координатами рассматриваемой зубчатой поверхности. Если один из параметров принять постоянным, например параметр  $\mu = \mu_i$ , то  $\vec{r} = \vec{r}(\lambda, \mu_i)$  представляет собой уравнение координатной линии на сопряженной поверхности нарезаемого зубчатого колеса. Это означает, что при фиксированном значении  $\mu$  конец вектора  $\vec{r} = \vec{r}(\lambda, \mu_i)$  при изменении параметра  $\lambda$  будет перемещаться на поверхности по некоторой линии, называемой координатной линией  $\lambda$ . Аналогичным образом, считая фиксированными значения параметра  $\lambda$  и изменяя параметр  $\mu$ , можно найти на поверхности другую координатную линию  $\mu$ . В зависимости от количества таких линий можно управлять точностью описания искомой поверхности нарезаемого зуба. По-

верхность нарезаемого зуба представлена на рис.4.

Рабочая часть зубьев поверхности является непрерывной, то есть уравнение  $\vec{r} = \vec{r}(\lambda, \mu)$  является непрерывной функцией аргументов  $\lambda$  и  $\mu$ , следовательно через каждую точку М поверхности должны проходить две координатные линии:  $\lambda = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ , имеющие в этой точке две несовпадающие касательные линии. Направления касательных линий к координатным линиям определяются как направления векторов  $\partial \vec{r} / \partial \lambda$  и  $\partial \vec{r} / \partial \mu$  (рис.4).

Основное уравнение зацепления (непрерывности станочного касания поверхностей) будет соблюдаться если векторы  $\partial \vec{r} / \partial \lambda$  и  $\partial \vec{r} / \partial \mu$  не коллинеарны и ни один из них не равен нулю. Следовательно, для производящей поверхности инструмента должно соблюдаться неравенство (2). Если это неравенство не соблюдается, то нарушается процесс внедрения поверхности инструмента в нарезаемую заготовку.

Нормаль к сопрягаемым поверхностям  $\vec{n}$  перпендикулярна плоскости,

содержащей векторы  $\vec{\partial r} / \partial \lambda$ ,  $\vec{\partial r} / \partial \mu$ , в данном исследовании она определяется следующим образом:

$$\vec{n} = \vec{\partial r} / \partial \lambda \times \vec{\partial r} / \partial \mu \quad (3)$$

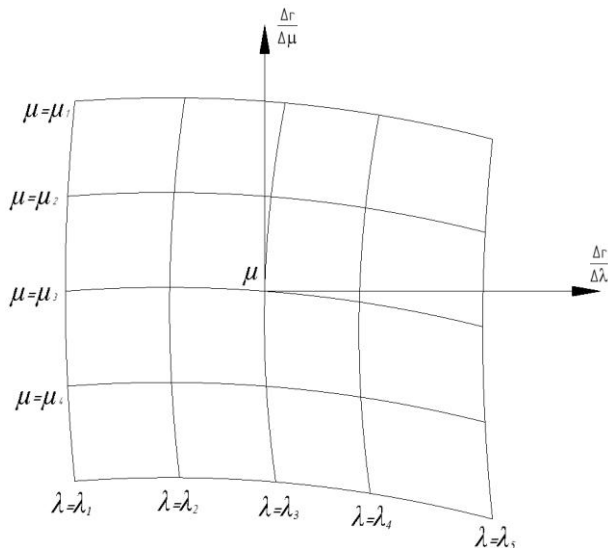


Рис. 4 Поверхность зуба

Необходимо отметить, что проведенные исследования показали, что при использовании новой схемы формообразования зуборезного инструмента выполняется основное уравнение зацепления. Разработанная схема формообразования зуборезного многозаходного инструмента позволила получить многозаходный инструмент у которого исходная инструментальная поверхность полностью совпадает с производящей поверхностью. Такой инструмент не затыловался, т.к. имел геометрические задние углы превышающие 8°. В результате исследований удалось при помощи одного многозаходного зуборезного инструмента нарезать цилиндрические прямозубые и косозубые зубчатые колеса любой геометрии, т.е. зубчатые колеса с различным числом зубьев.

### Список литературы

1. Гавриленко В.А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи / В.А. Гавриленко. – М.: Машиностроение, 1969. – 432 с.

2. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л.Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

3. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П.Р.Родин. – К.: Вища школа, 1990. – 424 с.

4. Сахаров Г.Н. Обкаточные инструменты / Г.Н. Сахаров – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.

5. Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. – М.: Машгиз, 1963. – 952 с.

6. Цвис Ю.В. Профилирование режущего обкатного инструмента / Ю.В. Цвис – М.: Машгиз, 1961. – 155 с.

7. Калашников А.С. Зубохонингование цилиндрических колес // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2013. - № 10 (88). – С. 22-29.

8. Artamonov E.V., Kireev V.V., Zyryanov V.A., Improving the Efficiency of Hobbing Mills, ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 5, pp. 447–449. Allerton Press, Inc., 2017. DOI: 10.3103/S1068798X17050057

9. Egorov S.B., Kapitanov A.V., Loktev D.A., Modern Methods and Technological Solutions for Effective Processing of Gear Wheels. Materials Science Forum, ISSN:1662-9752, Vol.870, pp 397-403, 2016 Trans Tech Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397

10. Papsheva N.D., Akushskaya O.M., Improving the efficiency of the process of gear cutting, Engineering journal of Don. 36 (2015) 54.

11. Жиганов, В. И. Механическая обработка зубчатых колес - ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, 2019, №4(16) JOURNAL OF MODERN TECHNOLOGIES, 2019, № 4(16): учебное пособие / В. И. Жиганов, Ю. А. Сахно, В. В. Демидов, Е. Ю. Сахно. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 134 с.

12. W. Liu, D. Ren, S. Usui, J. Wadell, T. D. Marusich, A gear cutting predictive model using the finite element method, J. CIRP. 8 (2013) 51-56.

### References

1. Gavrilenko V.A. Osnovy teorii evolventnoi zubchatoi peredachi / V.A. Gavrilenko V.A. – М.: Mashinostroenie, 1969. – 432 p.

2. Litvin F.L. Teoriya zubchatykh zastepeniy Litvin F.L. / – М.: Nauka, 1968. – 584 p.

3. Rodin P.R. Osnovy proektirovaniya rezhushchih instrumentov / P.R. Rodin . – К.: Vysha shkola, 1990. – 424 p.

4. Sakharov G.N. Obkatochnye instrumenty / G.N. Sakharov. – М.: Mashynostroenie, 1983. – 232 p.

5. Semenchenko I.I. Proektirovnie metallorezhushchih instrumentov / Semenchenko I.I., Matushin V.M., Sakharov G.N. – М.: Mashgiz, 1963. – 952 p.

6. Tsvi Yu.V. Profilirovanie rezhschego obkatnogo instrumenta / Yu.V. Tsvi – М.: Mashgiz, 1961. – 155 p.

7. Kalashnikov A.S. Zubokhningovanie tsilindricheskih koles // RITM: Remont. Innovazii Tehnologii. Modernizatsiya. – 2013. - № 10 (88). –p. 22-29.

8. Artamonov E.V., Kireev V.V., Zyryanov V.A., Improving the Efficiency of Hobbing Mills, ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 5, pp. 447–449. Allerton Press, Inc., 2017. DOI: 10.3103/S1068798X17050057

9. Egorov S.B., Kapitanov A.V., Loktev D.A., Modern Methods and Technological Solutions for Effective Processing of Gear Wheels. Materials Science Forum, ISSN:1662-9752, Vol.870, pp 397-403, 2016 Trans Tech Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.397

10. Papsheva N.D., Akushskaya O.M., Improving the efficiency of the process of gear cutting, Engineering journal of Don. 36 (2015) 54.

11. Zhyganov V.I. Mekhanicheskaya obrabotka zubchatyh koles – VESTNIK SOVREMENNYH TECHNOLOGIY , 2019, №4(16) JOURNAL OF MODERN TECHNOLOGIES, 2019, № 4(16): uchebnoe posobie / V.I. Zhyganov Yu.A. Sakhno, V.V. Demidov, E.Yu. Sakhno. – Uliyanovsk: UIGTU, 2011. – 134 p.

12. W. Liu, D. Ren, S. Usui, J. Wadell, T. D. Marusich, A gear cutting predictive model using the finite element method, J. CIRP. 8 (2013) 51-56.

*Для заметок*

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

**Выпуск №3(23) 2021**

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: [vst\\_sevsu@mail.ru](mailto:vst_sevsu@mail.ru)

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.